

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน  
โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์  
STUDY AND DEVELOPMENT OF VORTEX ATTRACTOR BY USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOPMENT OF VORTEX ATTRACTOR BY USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน  
โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

STUDY AND DEVELOPMENT OF VORTEX ATTRACTOR BY USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนพล ภูพันธ์ศรี รหัสประจำตัว 46010277
2. นาย นิธิภัทร ศรีธรรมพันธ์ รหัสประจำตัว 46010366

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน  
โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

นาย ธนพล ภูพันธ์ศรี 46010277

นาย นิติรักษ์ ศิริธรรมพันธ์ 46010366

ศศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงการชิ้นนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน (Vortex Attractor) อุปกรณ์นี้มีความสามารถในการดูดยึดติดพื้นผิวของของแข็งมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปโดยจะนำไปติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งในหุ่นยนต์ไต่กำแพง (Wall climbing robot) เพื่อให้มีความสามารถในการสร้างแรงดูดยึดเกาะผนังและต้านแรงโน้มถ่วงได้

การดำเนินงานของโครงการนี้จะมุ่งเน้นไปยังการศึกษาพัฒนาและออกแบบอย่างละเอียดโดยผ่านแนวทางการทำงานออกเป็นสองช่วงคือ การวิเคราะห์ผ่านทางสร้างแบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์หรือการทำซิมูเลชัน (Simulation) และการวิเคราะห์ผลการจำลองมาประยุกต์กับการทดลองประดิษฐ์ชิ้นงานทดสอบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะเป็นแนวทางต้นแบบและความรู้เพิ่มเติมแก่นักพัฒนาหุ่นยนต์ให้เข้าใจหลักการทำงานของระบบซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาให้มีสมรรถนะดียิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DEVELOPMENT OF VORTEX ATTRACTOR BY USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Mr. Thanapol Poopunsri

Mr. Nitiruk Sirithamman

Ass.Prof. Jaruwat Charoensuk      Adviser

**Abstract**

This report represents the study and development of the vortex attractor which based on the vortex movement of the fluid. A vortex generating apparatus has the capability of attracting and removable adhering one or more solid objects. The vortex attractor device will be installed as an essential part of a wall climbing robot. As a result, a robot will be able to resist the gravity force and stay balance on the wall without falling down.

The objective of this project focuses on design and development of the device, which can be achieved by means of computer simulations and experiments. The outcome of this project will hopefully help the robot developer in gaining better understanding on this device thus improving the robot's performance.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวนโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรก คือ ผ.ศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ด้วยดี ที่ให้คำแนะนำ สั่งสอน ให้ความเอาใจใส่ และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดเวลาในการทำวิจัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคุณนิวัติ ภูเจริญ ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากร ของภาคเครื่องกล ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณพ่อแม่ ที่อบรม สั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนน้องสาวและแฟนสาวที่คอยเป็นกำลังใจและดูแลในระหว่างการทำปริญญาานิพนธ์

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ อันเกิดจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรสุข สวัสดิ์แก่ทุกท่านด้วยเทอญ

ธนพล ภูพันธ์ศรี

นิติรักษ์ ศิริธรรมพันธ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
รายการสัญลักษณ์	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.1.1.1 ด้วยคุณสุญญาภาส	1
1.1.1.2 จานูดแม่เหล็ก	2
1.1.1.3 ผิวบีคติด	3
1.1.1.4 ตัวคูกระแสไหลวน	4
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.3. ขอบเขตของโครงการ	7
1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 หลักการทำงานและความสำคัญขององค์ประกอบในอุปกรณ์	8
2.1 แนวคิดและหลักการทำงานของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน	8
2.2 ข้อแตกต่างของระบบดูดแบบกระแสไหลวนและระบบทั่วไป	11
2.3 เปรียบเทียบลักษณะปรากฏการณ์ของอากาศภายในตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศที่มี การพัฒนาในด้านรูปร่าง ผ่านทางการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดง ความสำคัญขององค์ประกอบในอุปกรณ์	12
2.3.1 กรณีที่ไม่มีใบพัดมีเฉพาะกรอบแหวนด้านข้างกับแผ่นหลัง (Containing ring and backplate)	12
2.3.2 กรณีที่ไม่มีกรอบแหวนด้านข้างของอุปกรณ์	13
2.3.3 กรณีไม่มีแผ่นหลัง	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 กรณีมีครบทุกส่วน	16
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานและการวิเคราะห์อุปกรณ์สร้างแรงดูดกระแสไหลวน</b>	<b>19</b>
3.1 สมการพื้นฐานของการไหล	19
3.1.1 สมการอนุรักษ์มวล	20
3.1.2 สมการโมเมนตัม	21
3.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ Navier-Stokes	23
3.1.4 สมการ Euler สำหรับการไหลไร้ความหนืด	25
3.1.5 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation)	26
3.1.6 การไหลแบบ Vortex	26
3.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลของอากาศอันเนื่องจากอุปกรณ์สร้างแรงดูดกระแสไหลวน	28
3.2.1 ปรากฏการณ์การไหลวนของมวลอากาศภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน	29
3.2.1.1 ทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความแตกต่างของความดัน (Pressure Drop)	29
3.2.2 ปรากฏการณ์การไหลวนของมวลอากาศแบบเวอร์เทกซ์ (Vortex)	33
3.2.2.1 การไหลแบบคงตัวตามเส้นสายธารการไหลแบบโค้ง	33
3.2.2.2 ระนาบของการไหลวนแบบเวอร์เทกซ์ (Plane circular Vortex Flows)	35
3.2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวดูด	38
<b>บทที่ 4 แนวทางการพัฒนาและออกแบบ</b>	<b>39</b>
4.1 ความสำคัญและที่มา	39
4.2 วัตถุประสงค์	39
4.3 ขอบเขตของการพัฒนา	39
<b>บทที่ 5 การจำลองการไหล</b>	<b>41</b>
5.1 บทนำ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 แบบจำลองการไหลภายในอุโมงค์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน	41
5.2.1 ขอบเขตของปัญหา	41
5.2.2 รายละเอียดโครงสร้างอุโมงค์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ใช้ในการจำลองการไหล	42
5.2.2.1 อุโมงค์ A อุโมงค์ต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนา	42
5.2.2.2 อุโมงค์ B1, B2 และ B3 อุโมงค์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใบพัด	43
5.2.2.3 อุโมงค์ D1, D2 และ D3 อุโมงค์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบ	45
5.2.2.4 อุโมงค์ C1, C2 และ C3 อุโมงค์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งมนของกรอบครอบ	47
5.2.2.5 อุโมงค์ M อุโมงค์ต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาโดยนำเอาส่วนดีของแต่ละกรณีใหญ่มารวมกัน	49
5.2.3 เงื่อนไขขอบเขต	49
5.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม STAR-CD®	50
5.3.1 สร้าง Mesh ด้วย MSC.visualNastran 2002	50
5.3.2 การจำลองเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของความดันและสนามความเร็ว	52
5.3.2.1 กำหนดค่าคุณสมบัติให้กับชิ้นงาน	53
บทที่ 6 ผลการจำลองการไหล	67
6.1 บทนำ	67
6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุโมงค์ A กับ อุโมงค์ B1, B2 และ B3	68
6.2.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุโมงค์ A, B1, B2 และ B3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว	68
6.2.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดัน A, B1, B2 และ B3	69
6.3 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุโมงค์ A กับ อุโมงค์ D1, D2 และ D3	72
6.3.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุโมงค์ A, D1, D2 และ D3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว	72
6.3.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดัน A, D1, D2 และ D3	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A กับ อุปกรณ์ C1, C2 และ C3	76
6.4.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว	76
6.4.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดัน A, C1, C2 และ C3	77
6.5 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A กับ อุปกรณ์ M	80
6.5.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปกรณ์ A และ M โดยสังเกตจากสนามความเร็ว	80
6.5.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดัน A และ M	81
6.6 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M	83
<b>บทที่ 7 การออกแบบสร้างและทดสอบตัวดูดกระแสไหลวนต้นแบบ</b>	<b>87</b>
7.1 การออกแบบ โครงสร้างตัวดูดกระแสไหลวนต้นแบบ	87
7.1.1 ใบพัด	87
7.1.1.1 ใบพัดแบบเดิม	87
7.1.1.2 ใบพัดแบบใหม่	88
7.1.2 ชุดตัวดูดกระแสไหลวน	90
7.1.2.1 กรอบครอบ	90
7.1.2.2 ตัวค้ำยัน	90
7.1.3 มอเตอร์	91
7.1.4 ชุดเฟืองทด	91
7.1.5 โครงสร้างโดยรวมของตัวดูดกระแสไหลวน	91
7.2 การทดลองตัวดูดกระแสไหลวน (Vortex Attractor)	92
7.2.1 ทดลองสมรรถนะของใบพัดทั้งสองแบบ	92
7.2.1.1 อุปกรณ์การทดลอง	92
7.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง	94
7.3 ผลการทดลองและแนวทางการประเมินผล	96
7.3.1 เปรียบเทียบสมรรถนะของรูปแบบใบพัดแบบเดิมกับแบบใหม่	96
7.4 สรุปผลการทดลอง	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 บทสรุปและวิจารณ์	100
8.1 บทสรุปและประเมินผล	100
8.1.1 สรุปผลเชิงเปรียบเทียบของผลการจำลองกับการทดลอง	100
8.1.2 ประเมินผลการจำลองกับการทดลอง	102
8.1.3 สรุปผลการดำเนินงาน	102
8.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข	102
8.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต	103
เอกสารอ้างอิง	104



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 แสดงค่าสมรรถนะแรงดุดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3	71
6.2 แสดงค่าสมรรถนะแรงดุดของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3	75
6.3 แสดงค่าสมรรถนะแรงดุดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3	79
6.4 แสดงค่าสมรรถนะแรงดุดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3	82
6.5 แสดงค่าสมรรถนะแรงดุดของอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M	84
7.1 ตารางผลการทดลองแสดงสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบเดิม	96
7.2 ตารางผลการทดลองสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบใหม่	97
7.3 ตารางผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบเดิมและใบพัดแบบใหม่	97
8.1 ตารางแสดงค่าแรงที่รับได้กับค่าสมรรถนะจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์กับการทดลองจริง ณ ความเร็วรอบต่างๆ	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1.1 หุ่นขี้ดติดที่ใช้ระบบด้วยชุดสูญญากาศ	1
รูป 1.2 หุ่นขี้ดติดที่ใช้ระบบด้วยชุดสูญญากาศ	1
รูป 1.3 อุปกรณ์ด้วยชุดสูญญากาศ	2
รูป 1.4 หุ่นยนต์ขณะกำลังดำเนินงาน	2
รูป 1.5 ภาพด้านข้างของอุปกรณ์จานดูดแม่เหล็ก	2
รูป 1.6 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนว Vertical	2
รูป 1.7 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนว Horizontal	2
รูป 1.8 หุ่นยนต์ไต่ผนังขี้ดติดชนิดล้อ	3
รูป 1.9 หุ่นยนต์ไต่ผนังขี้ดติดแบบเท้า	3
รูป 1.10 หุ่นยนต์ไต่ผนังขี้ดติดแบบเท้า	3
รูป 1.11 ตัวดูดกระแสไหลวน โดยติดล้อให้เคลื่อนที่ได้	4
รูป 1.12 ตัวดูดกระแสไหลวนที่ถูกประยุกต์เข้ากับกล้องวงจรปิดเพื่อใช้งาน	4
รูป 1.13 ตัวดูดกระแสไหลวนแบบอยู่นิ่ง	4
รูป 1.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านความเร็วของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	5
รูป 1.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	5
รูป 1.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	5
รูป 1.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านความยืดหยุ่นของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	6
รูป 1.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านความหลากหลายของพื้นผิวผนัง ของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	6
รูป 1.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านเสียงขณะปฏิบัติงานของหุ่นยนต์แต่ละแบบ	6
รูป 2.1 ปล่องความร้อนระบายอากาศบนหลังคาตามอาคาร	8
รูป 2.2 ปล่องความร้อนระบายอากาศ	8
รูป 2.3 เส้นทางเดินของอากาศขณะผ่านใบพัด	8
รูป 2.4 แสดงเส้นทางเดินของอากาศเมื่อถูกกรอบด้านข้างของอุปกรณ์	8
รูป 2.5 แสดงเส้นทางเดินของอากาศที่หมุนเป็นเกลียวก่อเกิดกำแพงอากาศที่หมุนเป็นเกลียว ก่อเกิดกำแพงอากาศ	9
รูป 2.6 แสดงเส้นทางเดินอากาศแบบเทอร์อยด์ทั้งภายในและนอก	9
รูป 2.7 อุปกรณ์ตัวดูดกระแสไหลวนที่ติดตั้งในหุ่นยนต์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 2.8 ความหลากหลายของชนิดพื้นผิวที่อุปกรณ์ตัวดูดกระแสไหลวนทำงานได้	10
รูป 2.9 แสดงเส้นทางเดินของอากาศขณะผ่านใบพัดเครื่องดูดอากาศทั่วไป	11
รูป 2.10 แสดงเส้นทางเดินของอากาศในตัวดูดกระแสไหลวน	11
รูป 2.11 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 1	12
รูป 2.12 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง	13
รูป 2.13 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน	13
รูป 2.14 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น	13
รูป 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุด ศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)	13
รูป 2.16 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 2	14
รูป 2.17 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง	14
รูป 2.18 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน	14
รูป 2.19 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น	14
รูป 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุด ศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)	14
รูป 2.21 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 3	15
รูป 2.22 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง	15
รูป 2.23 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน	15
รูป 2.24 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น	16
รูป 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่ จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)	16
รูป 2.26 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 4	16
รูป 2.27 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง	17
รูป 2.28 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน	17
รูป 2.29 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น	17
รูป 2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุด ศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ของแต่ละกรณี	18
รูป 3.1 เอลิเมนต์ของของไหล	19
รูป 3.2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล	20
รูป 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหกด้านของเอลิเมนต์ของไหล	22
รูป 3.4 แสดงการไหลแบบ forced vortex	28
รูป 3.5 แสดงลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านใบพัด	29
รูป 3.6 แสดงพิกัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศ	30
รูป 3.7 แสดงพิกัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านใบพัดตรง	32
รูป 3.8 แสดงการไหลตามเส้นสายการไหล (Stream line)	33
รูป 3.9 แสดงการไหลวนแบบบังคับ (Forced Vortex)	35
รูป 3.10 แสดงการไหลวนของกำแพงอากาศในแกน r-z	37
รูป 4.1 แสดงแผนผังของแนวทางการพัฒนา	40
รูป 5.1 แสดงตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันของอากาศ	42
รูป 5.2 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ A	42
รูป 5.3 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B1	43
รูป 5.4 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B2	44
รูป 5.5 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B3	44
รูป 5.6 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D1	45
รูป 5.7 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D2	46
รูป 5.8 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D3	46
รูป 5.9 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ C1	47
รูป 5.10 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ C2	48
รูป 5.11 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ C3	48
รูป 5.12 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ M	49
รูป 5.13 แสดงขั้นตอนการเข้าโปรแกรมและนำเข้าไฟล์ชิ้นงานที่เป็น Palasolid	50
รูป 5.14 แสดงขั้นตอนการสร้าง Mesh	51
รูป 5.15 แสดงขั้นตอนการส่งออกไฟล์ชิ้นงานเป็น Partran	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 5.16 แสดงรายละเอียดปัญหาของการจำลองการไหล	53
รูป 5.17 แสดงขั้นตอนการเข้าโหมด pro-STAR	53
รูป 5.18 แสดงขั้นตอนการกำหนด Rotating Frame และ การนำเข้าไฟล์ชิ้นงาน Partam	54
รูป 5.19 แสดงขั้นตอนการ Merge ไฟล์ชิ้นงาน และการเข้าสู่หน้าต่าง Cell Tool	55
รูป 5.20 แสดงขั้นตอนการกำหนดของไหลส่วนที่มีใบพัดให้เป็นการไหลที่มีการหมุน ในหน้าต่าง Cell Tool	55
รูป 5.21 แสดงขั้นตอนการเลือกส่วนของไหลที่มีใบพัดอยู่เป็นของไหลประเภทที่ 2 (ของไหลที่มีการหมุน)	56
รูป 5.22 แสดงขั้นตอนการกำหนด Boundary Location	57
รูป 5.23 แสดงขั้นตอนการตรวจสอบ Boundary Location	57
รูป 5.24 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของไหล	58
รูป 5.25 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Boundary Condition	59
รูป 5.26 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Analysis Control	60
รูป 5.27 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Analysis Output และการตรวจสอบชิ้นงาน	61
รูป 5.28 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Set Run Time Controls และ Analysis (re)Start	62
รูป 5.29 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Run Analysis และ การเขียนไฟล์ Geometry กับ Problem	63
รูป 5.30 แสดงขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์ของการจำลอง	64
รูป 5.31 แสดงผลลัพธ์ของความแตกต่างของความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ	65
รูป 5.32 แสดงขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์ของการจำลองเป็นกราฟ	66
รูป 6.1 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ A, B1, B2 และ B3	68
รูป 6.2 แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ A, B1, B2 และ B3	69
รูป 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลาง ถึงกรอบครอบของอุปกรณ A, B1, B2 และ B3	70
รูป 6.4 กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ A, B1, B2 และ B3	71
รูป 6.5 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ A, D1, D2, และ D3	72
รูป 6.6 แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ A, D1, D2 และ D3	73
รูป 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลาง ถึงกรอบครอบของอุปกรณ A, D1, D2 และ D3	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูป 6.8	กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3	75
รูป 6.9	แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3	76
รูป 6.10	แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3	77
รูป 6.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3	78
รูป 6.12	กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3	79
รูป 6.13	แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ์ A และ M	80
รูป 6.14	แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์ A และ M	81
รูป 6.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A และ M	82
รูป 6.16	กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A และ M	83
รูป 6.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M	84
รูป 6.18	กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M	85
รูป 6.19	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงคูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A ของอุปกรณ์ B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M	86
รูป 7.1	ชีใบพัดรูปแบบเดิม	87
รูป 7.2	ชีใบพัดรูปแบบใหม่	88
รูป 7.3	ใบพัดรูปแบบเก่า	88
รูป 7.4	ใบพัดรูปแบบใหม่	89
รูป 7.5	ใบพัดรูปแบบเก่าในแนวด้านข้าง	89
รูป 7.6	ใบพัดรูปแบบเก่าในแนวด้านบน	89
รูป 7.7	ใบพัดรูปแบบใหม่ในแนวด้านข้าง	89
รูป 7.8	ใบพัดรูปแบบใหม่ในแนวด้านบน	89
รูป 7.9	วัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้ทำกรอบครอบ	90
รูป 7.10	ตัวถ้ำยัน	90
รูป 7.11	ตัวถ้ำยัน	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 7.12 ชุดเกียร์ทศรอบ	91
รูป 7.13 ตัวดูดกระแสไหลวนต้นแบบ	92
รูป 7.14 ตัวดูดกระแสไหลวนต้นแบบ	92
รูป 7.15 DC Power Supply	93
รูป 7.16 Tachometer พร้อมกล่องใส่เครื่องมือ	93
รูป 7.17 Tachometer	93
รูป 7.18 เครื่องชั่งน้ำหนัก	93
รูป 7.19 ชุดการทดลอง	94
รูป 7.20 ตัวดูดกระแสไหลวนขณะทำงาน	94
รูป 7.21 ทำการปรับกระแสและความต่างศักย์เพื่อให้ได้รอบการหมุนที่เหมาะสม	95
รูป 7.22 ขณะเทน้ำวัดสามารถในการรับน้ำหนัก	95
รูป 7.23 วัดน้ำหนักน้ำ	96
รูป 7.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบใบพัดทั้งสองแบบตามค่าน้ำหนักของน้ำที่รับได้ (กรัม) กับความเร็วรอบใบพัด	98
รูป 7.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบใบพัดทั้งสองแบบตามขนาดแรงที่รับได้ (นิวตัน) กับความเร็วรอบใบพัด	98
รูป 8.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงที่รับได้จากการจำลองสถานการณ์ ทางคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง ณ ความเร็วรอบต่างๆ	101

## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
$a_n$	ความเร่งในทิศตั้งฉากกับรัศมี (normal direction)
$b$	ทิศทางตามแนวน้ำหนัก
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลาง
$\vec{e}_r$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวรัศมี
$\vec{e}_z$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศทางตามแนวตั้ง
$\vec{e}_\theta$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวสัมผัสกับรัศมี
$f$	แรงสุทธิที่กระทำต่อก้อนของไหล
$f_\sigma$	แรงกระทำคอริออลิส (Corioris force)
$f_n$	แรงกระทำเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal force)
$f_b$	แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนัก (Body force)
$F_{adhesive}$	แรงยึดติด
$F$	แรงสุทธิ
$F_s$	แรงที่กระทำกับพื้นผิว
$F_b$	แรงกระทบกับ Body
$g$	ความเร่งโน้มถ่วง
$H$	พลังงานรวมต่อน้ำหนัก (Total head)
$K$	ค่าคงที่ (Constant)
$\dot{m}$	อัตราการไหล (Mass flow rate)
$n$	ทิศทางในแนวตั้งฉากกับเส้นทางการไหล
$K$	พลังงานศักย์(Potential Energy)
$p$	ความดัน (Pressure)
$R$	รัศมีของเส้นทางการเดินของไหล
$r$	ระยะทางตามแนวรัศมี
$t$	เวลา
$\vec{i}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวสัมผัสกับเส้นทางการไหล
$u$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวแกน x
$\dot{V}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$v$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
$v_n$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวแกนตั้งฉากกับรัศมี
$v_r$	ความเร็วตามแนวรัศมี
$v_\theta$	ความเร็วตามแนวแกน $\theta$
$w$	ความเร็วสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของไหล
$x$	ทิศทางในแนวแกน $x$
$\bar{x}$	เวกเตอร์ระยะทางของรัศมี
$y$	ทิศทางในแนวแกน $y$
$z$	ทิศทางในแนวแกน $z$
Greek alphabet	
$\mu$	ความหนืด (Dynamic viscosity)
$\rho$	ความหนาแน่น
$\theta$	มุมตามแนวรัศมีที่กวาดไป
$\beta$	มุมของเส้นทางเดินของไหล
$\Omega$	ความเร็วเชิงมุม
$\sigma$	ทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส
$\sigma_{ii}$	Normal stress in $i$ direction
$\tau_{ii}$	Shear stress
$\psi$	Stream function
$\phi$	Potential function
$\Gamma$	Circulation
$\zeta$	Vorticity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

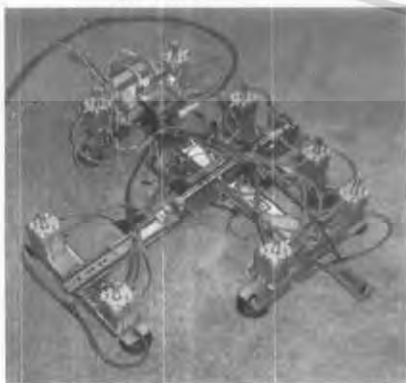
#### 1.1.1 ความสำคัญและที่มา

ในโลกยุคโลกาภิวัตน์นี้ หุ่นยนต์นับได้ว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เกือบทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ด้านการขนส่ง ด้านเทคโนโลยีทางการแพทย์ การศึกษา การบริการ และอื่นๆ อีกมากมาย เนื่องจากมีข้อดีและประโยชน์ที่น่าสนใจ หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ในสภาพที่ไม่เหมาะกับมนุษย์และมีความละเอียดแม่นยำกว่าในบางสาขาของงาน วิศวกรรมการทางด้านเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ได้ก้าวล้ำไปมากในปัจจุบัน ในอนาคตอันใกล้นี้เราจะได้เห็นรถยนต์ไร้คนขับหรือหุ่นยนต์ส่งสินค้าอย่างแน่นอน

เทคโนโลยีของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่นั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นหุ่นยนต์จำพวก ล้อ ขา และตีนตะขาบ ซึ่งจะเป็นการเคลื่อนที่บนผิวระนาบ และผิวเรียบ ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้เกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง หรือ สามารถต้านแรงโน้มถ่วงของโลกได้ เราจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในทั้งสองแนว คือ แนวราบและแนวตั้งได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นมา มีหลากหลายรูปแบบด้วยกัน อาทิเช่น จานดูดแม่เหล็ก ถ้วยดูดสุญญากาศ ผิวขี้ดติด ขอบกรงสร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน หากแต่เทคโนโลยีแต่ละแบบยังคงมีข้อบเขตและความสามารถของการทำงานในแต่ละรูปแบบแตกต่างกันไป ดังนั้นเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ใดหนึ่งจึงควรได้รับการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ออกมาเป็นองค์ความรู้และนำไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์พัฒนาหุ่นยนต์รุ่นต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โครงการศึกษา พัฒนาและออกแบบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์จึงเกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางและแหล่งความรู้สำหรับการศึกษาและสร้างหุ่นยนต์ได้หนึ่งที่สามารถใช้งาน ได้จริงและมีสมรรถนะมากขึ้นต่อไปในอนาคต

เพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบการทำงานของหุ่นยนต์ได้แก่แบ่งแต่ละชนิด เราจะจำแนกเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ได้หนึ่งแต่ละชนิดออกมาได้ โดยแบ่งออกเป็น ๔ ประเภท ดังนี้

#### 1.1.1.1 ถ้วยดูดสุญญากาศ



รูป 1.1 หุ่นขี้ดติดที่ใช้ระบบถ้วยดูดสุญญากาศ



รูป 1.2 หุ่นขี้ดติดที่ใช้ระบบถ้วยดูดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1.3 อุปกรณ์ด้วยชุดสุญญากาศ



รูป 1.4 หุ่นยนต์ขณะกำลังดำเนินงาน

รูปแบบการทำงาน การทำงานของอุปกรณ์ด้วยชุดสุญญากาศนั้นจะเป็นการใช้หลักการของระบบนิวเมติก(Pneumatic) ขจัดอากาศภายในด้วยชุด โดยมีปั๊มลมทำหน้าที่ดูดอากาศออกเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศในถ้วย เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถยึดติดกับผนัง

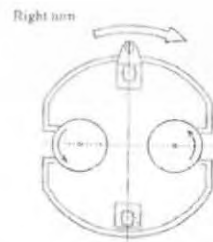
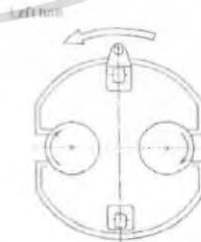
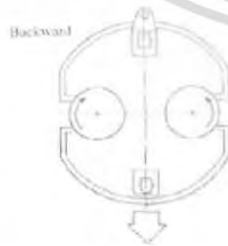
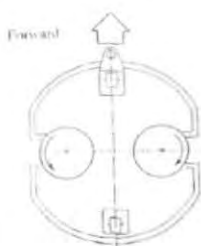
ข้อได้เปรียบ สามารถรับน้ำหนักได้ค่อนข้างมาก ระดับเสียงระหว่างทำงานมีปริมาณค่อนข้างเบา

ข้อจำกัด สามารถยึดติดได้เฉพาะผิวเรียบ ความสามารถในการเคลื่อนที่ช้า และมีระบบการทำงานค่อนข้างยุ่งยาก

1.1.1.2 งานจุดแม่เหล็ก



รูป 1.5 รางด้านข้างของอุปกรณ์งานจุดแม่เหล็ก



รูป 1.6 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนว Vertical

รูป 1.7 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนว Horizontal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปแบบการทำงาน** การทำงานของจานดูดแม่เหล็กนั้นเป็นการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายในหุ่นยนต์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กบริเวณผิวของอุปกรณ์ยึดติดเพื่อให้เกิดแรงดูดกับผนังที่เป็นโลหะ นอกจากนี้จะทำการเคลื่อนที่โดยอาศัยมอเตอร์ 2 ตัวในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์

ในการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งมีทิศทางข้างหน้าหรือข้างหลังมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวโดยจะทำงานคนละทิศกันเพื่อขับให้จานดูดแม่เหล็กเคลื่อนที่ แต่เมื่อต้องการเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวา มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะงานไปในทิศทางเดียวกันเพื่อหมุนจานดูดแม่เหล็กและจึงเคลื่อนที่ไปในทิศทางข้างหน้าต่อไป

**ข้อได้เปรียบ** สามารถรับน้ำหนักได้สูงและเสียงระหว่างทำงานมีปริมาณเบา

**ข้อจำกัด** สามารถยึดติดได้เฉพาะผิวหน้าของผนังที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะเท่านั้น มิฉะนั้นจะไม่สามารถยึดติดและเคลื่อนที่ได้

### 1.1.1.3 ผิวยึดติด

**รูปแบบการทำงาน** การทำงานของผิวยึดติดจะใช้หลักการทางนาโนเทคโนโลยีผลิตสารที่มีความสามารถในการยึดติดสูงมาเคลือบบริเวณอุปกรณ์ที่สัมผัส เช่น ล้อหรือขาของหุ่นยนต์ โดยมีต้นแบบมาจากการยึดเกาะผนังแบบเท้าของจิ้งจก



รูป 1.8 หุ่นยนต์ได้ผนังผิวยึดติดชนิดล้อย

รูป 1.9 หุ่นยนต์ได้ผนังผิวยึดติดแบบเท้า



รูป 1.10 หุ่นยนต์ได้ผนังผิวยึดติดแบบเท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข้อได้เปรียบ** สามารถได้ผนังได้ทุกประเภท ปริมาณเสียงระหว่างทำงานมีปริมาณเบา

**ข้อจำกัด** รับน้ำหนักได้น้อย วัสดุมีราคาแพง

#### 1.1.1.4 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

**รูปแบบการทำงาน** การทำงานของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนจะอาศัยมอเตอร์ขับใบพัด ในการสร้างความแตกต่างของความดันภายในด้วยกรอบ ใบพัดจะกวาดอากาศให้เกิดกระแสไหลวนภายในตัวดูด เมื่อความเร็วของกระแสไหลวนของอากาศมากจะทำให้เกิดการลดลงของความดันภายในอุปกรณ์มากขึ้นด้วย เพื่อให้ เกิดแรงกดจากความดันอากาศภายนอก อันจะส่งผลให้ตัวดูดสามารถยึดเกาะผนังและเพดานได้

**ข้อได้เปรียบ** สามารถใช้งานในพื้นที่ผิวได้หลากหลาย ให้แรงดูดปานกลาง ค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่สูง มากนักสามารถประดิษฐ์ได้ด้วยตัวเอง

**ข้อจำกัด** มีปริมาณเสียงค่อนข้างสูงขณะหุ่นยนต์ทำงาน ไม่สามารถใช้งานในพื้นที่ขรุขระมากได้ เพราะจะทำให้อุปกรณ์สูญเสียภาวะสูญญากาศไปได้



รูป 1.11 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน โดยติดล้อให้เคลื่อนที่ได้



รูป 1.12 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ถูก

ประยุกต์เข้ากับกล่องวงจรปิดเพื่อใช้งาน

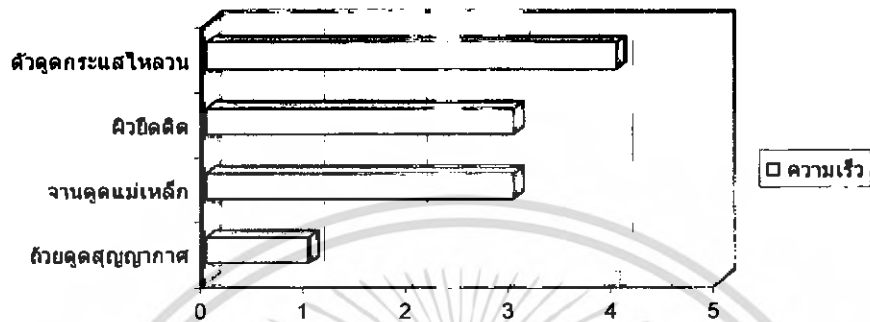
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



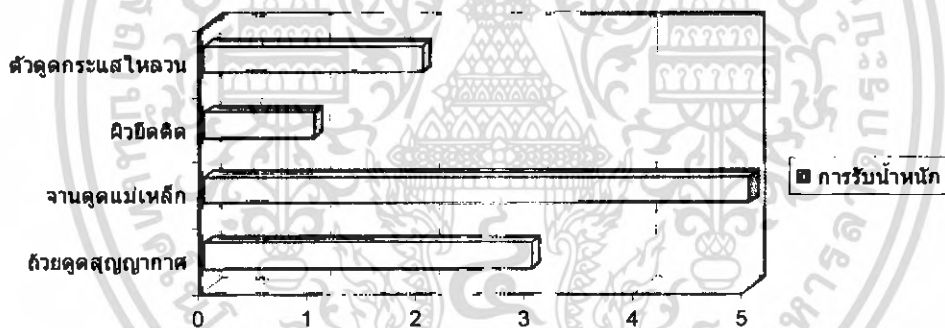
รูป 1.13 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศ

กระแสไหลวนแบบอยู่นิ่ง

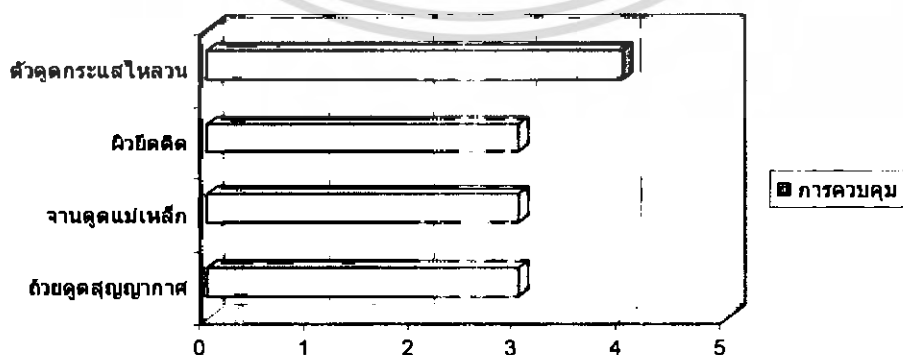
จากที่กล่าวไปในเบื้องต้นถึงชนิดและหลักการการทำงานที่ต่างกันของหุ่นยนต์ได้กำเเพง ต่อจากนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละรูปแบบเพื่อให้เห็นถึงภาพรวมข้อดีของหุ่นยนต์ได้หนึ่งแบบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนซึ่งนับว่ามีสมรรถนะดีที่สุดในภาพรวม โดยทำการแยกและจัดระดับสมรรถนะของระบบการทำงานแต่ละแบบในแต่ละด้าน โดยมีผลแสดงดังนี้



รูป 1.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านความเร็วของหุ่นยนต์แต่ละแบบ

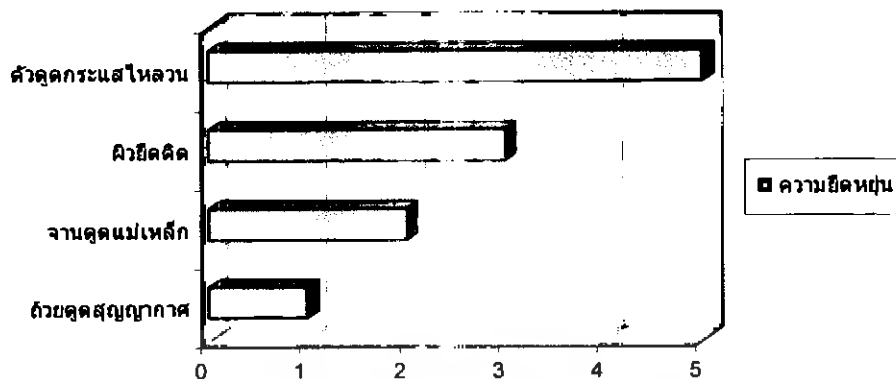


รูป 1.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านการรับน้ำหนักของหุ่นยนต์แต่ละแบบ

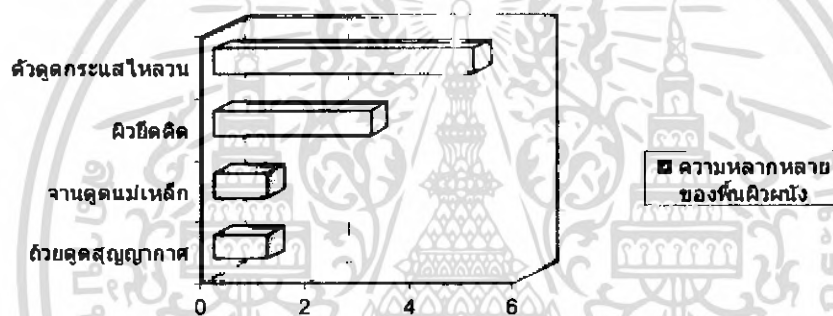


รูป 1.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านการควบคุมของหุ่นยนต์แต่ละแบบ

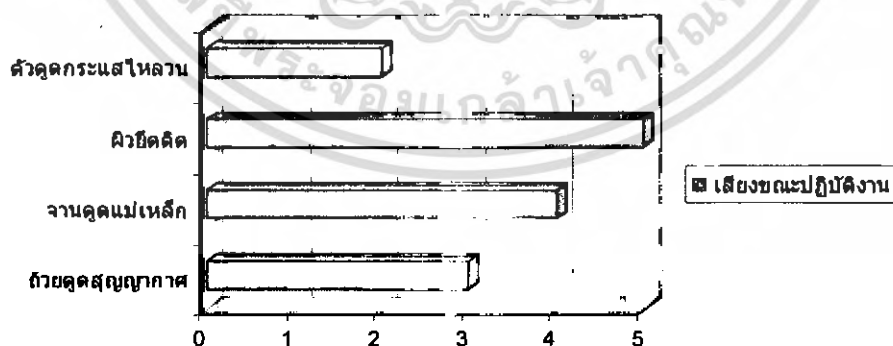
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านความขีตหุ่ณของหุ่นยนต์แต่ละแบบ



รูป 1.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านความหลากหลายของพื้นคิวนังของหุ่นยนต์แต่ละแบบ



รูป 1.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านเสียงขณปฏิบัติงานของหุ่นยนต์แต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การทำงานของอุปกรณ์ได้และพัฒนาระบบดูดอากาศแบบกระแสไหลวนให้มีสมรรถนะในการยึดติดสูงขึ้น โดยจะทำการศึกษา วิเคราะห์พัฒนา และออกแบบระบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนผ่านทาง การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD® [6] เพื่อนำผลการจำลองมาเป็นต้นแบบในการประดิษฐ์ชิ้นงานจริงขึ้นมา อันนำไปสู่การลดต้นทุน ความเสี่ยงจากการสูญเสียและเวลาในการดำเนินงานของการทดลองจริง

## 1.3. ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 นำทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหลมาประยุกต์เพื่อทำความเข้าใจหลักการทำงานได้อย่างละเอียด

1.3.2 สร้างแบบจำลองการไหลผ่านทางโปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD® [6] แสดงให้เห็นพฤติกรรมการไหลวนของอากาศภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน และแสดงความแตกต่างก่อนและหลังการพัฒนา โดยมุ่งเน้นไปที่การลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอื่นอากาศ ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบ

1.3.3 นำสิ่งที่ค้นพบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเป็นต้นแบบในการสร้างชุดทดลองจริงเพื่อเป็นต้นแบบรองรับผลการจำลอง

1.3.4 พัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนให้มีสมรรถนะในการยึดติดสูงขึ้น โดยการออกแบบและปรับปรุง อุปกรณ์ส่วนต่างๆให้ดีขึ้น

## 1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาการทำงานของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนให้มีสมรรถนะในการยึดติดสูงขึ้น

1.4.2 สามารถนำเอาการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้

1.4.3 สามารถสร้างชุดทดลองจริงขึ้นมารองรับผลการจำลองได้

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและความรู้แก่ตัวนักศึกษา

1.4.5 มีประโยชน์แก่ผู้ที่ต้องการนำความรู้ด้านนี้และเป็นข้อมูลเพิ่มเติมไปใช้ประยุกต์กับการประดิษฐ์หุ่นยนต์ใต้น้ำแกแวงจริง ๆ ขึ้นมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

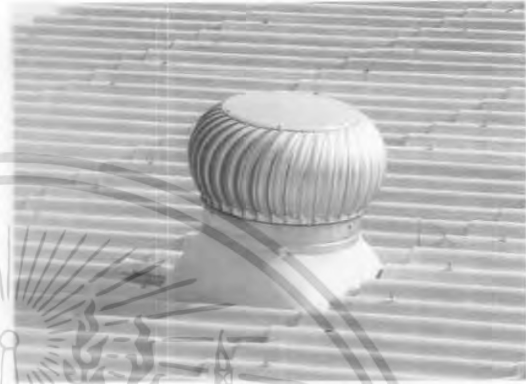
## บทที่ 2

### หลักการงานและความสำคัญขององค์ประกอบในอุปกรณ์

#### 2.1 แนวคิดและหลักการงานของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน



รูป 2.1 ปล่องความร้อนระบายอากาศบนหลังคาตามอาคาร



รูป 2.2 ปล่องความร้อนระบายอากาศ

แนวคิดเบื้องต้นของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนี้ ในช่วงแรกเดิมที่เป็นการคิดค้นเพื่อต้องการนำการไหลวนของอากาศมาขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ โดยให้ความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นมาเป็นเครื่องมือ ยกตัวอย่างเช่น ปล่องระบายอากาศตามโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกโรงงานเป็นตัวขับเคลื่อนอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ โดยอากาศภายในโรงงานที่มีความดันสูงกว่าจะเคลื่อนที่ออกไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าโดยผ่านทางใบพัดทำให้ใบพัดหมุนได้ต่อเนื่อง เมื่อคิดในทางกลับกันหากเราสร้างอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศแบบไหลวนขึ้น ความแตกต่างของความดันจะเกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นสิ่งนี้อาจจะส่งผลทำให้เกิดแรงกระทำต่อระบบได้ทันทีเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันนั้น



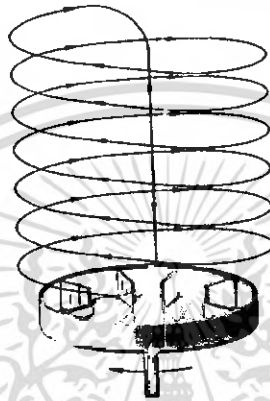
รูป 2.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศขณะผ่านใบพัด



รูป 2.4 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศเมื่อถูกครอบด้วยด้านข้างของอุปกรณ์

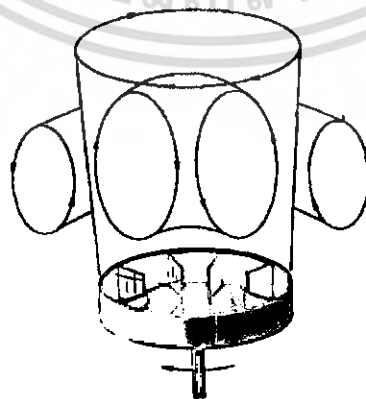
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนี้เริ่มเมื่ออุปกรณ์หมุนทำให้เกิดการขับเคลื่อนและส่งถ่ายพลังงานให้อากาศที่อยู่บริเวณใบพัด (Vane) มีความเร็วและถูกเหวี่ยงให้เคลื่อนตัวเป็นวงกลม โดยบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ อากาศจะถูกเหวี่ยงออกจากศูนย์กลางทำให้อากาศตรงแกนกลางถูกขับดันออกไปตามแนวรัศมีดังรูป 2.3 จนชนกรอบด้านข้าง (Containing ring) เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นในทิศแนวตั้งดังรูป 2.4 ดังนั้นมวลอากาศจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ 2 ทิศ คือ การเคลื่อนที่เป็นวงกลมซึ่งมาจากการกระทำของใบพัด และการเคลื่อนที่ในทิศขึ้นอันเนื่องมาจากการชนกับผนัง



รูป 2.5 แสดงเส้นทางเดินของอากาศที่หมุนเป็นเกลียวก่อเกิดกำแพงอากาศ

เมื่อนำเวกเตอร์การเคลื่อนที่ทั้งสองตัวมารวมกันแล้วพบว่า ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะแบบเกลียวขึ้นมา (Spiral) ดังรูป 2.5 มันจะทำหน้าที่คล้ายกำแพงอากาศ (Vortex wall) คอยป้องกันและรักษาความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกได้ เพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามารบกวนภายในในระบบที่มีความดันน้อยกว่า แต่หลังจากที่อากาศเคลื่อนที่ไปได้ระยะหนึ่ง อากาศที่ไหลวนบริเวณกำแพงอากาศจะเริ่มมีความเร็วลดลง เพราะถูกเสียดสีจากอากาศภายนอกที่อยู่นิ่ง จนกระทั่งอากาศไหลกลับมาในระบบและเคลื่อนที่เข้าสู่แกนกลางของใบพัดอีกครั้ง หลังจากเคลื่อนที่ขึ้นไปได้สูงระดับหนึ่ง



รูป 2.6 แสดงเส้นทางเดินอากาศแบบเทอร์อยด์ทั้งภายในและนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจัยการไหลเวียนของอากาศที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนั้นเป็นภาพรวมของการไหลของอากาศ แต่เราสามารถแบ่งออกเป็นการไหลวนแบบย่อยได้อีก โดยอย่างแรกคือ การไหลวนของอากาศที่มีลักษณะเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือกำแพงอากาศ (Vortex wall) ดังรูป 2.6 ที่คอยรักษาความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกไว้ การไหลวนแบบนี้ถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักของระบบนี้ แบบที่สองเป็นการไหลวนแบบเทอรอยด์ (Toroidal vortex) ดังรูป 2.6 โดยจะมีอยู่สองบริเวณนั้นคือ บริเวณภายในและภายนอกกำแพงอากาศซึ่งจะพบว่าพลังงานของอากาศภายในจะมีมากกว่าภายนอก เนื่องจากพลังงานในการสร้างการไหลแบบเทอรอยด์มาจากพลังงานของกำแพงอากาศ ฉะนั้นหากเกิดการไหลแบบเทอรอยด์มากเกินไปพลังงานของกำแพงอากาศจะลดลงได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการยึดติดพื้นผิวก็จะลดลงตาม

เมื่ออุปกรณ์ได้สร้างความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกขึ้น หากเรานำตัวอุปกรณ์เคลื่อนไปไว้ใกล้กับผนัง ด้วยสาเหตุที่ว่าความดันในอุปกรณ์นั้นน้อยกว่าความดันภายนอกจะทำให้เกิดแรงภายนอกมากระทำกับอุปกรณ์ในลักษณะกดทับอุปกรณ์ติดกับผนังไว้ สิ่งนี้ถือสาเหตุที่ว่าทำไมเราจึงนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หนึ่งในการประดิษฐ์หุ่นยนต์ได้กำแพงได้ โดยกำแพงอากาศที่เกิดจากใบพัดจะทำหน้าที่รักษาสภาพความแตกต่างระหว่างความดันภายนอกและภายในให้คงที่ตลอดเวลา

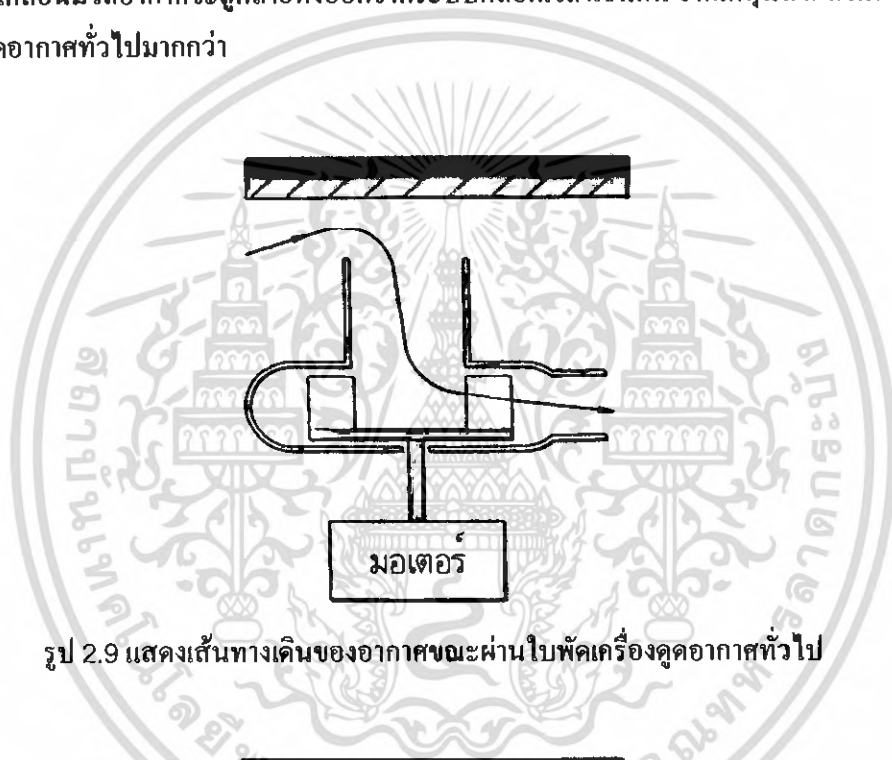
รูป 2.7 อุปกรณ์อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ติดตั้งในหุ่นยนต์ [8]



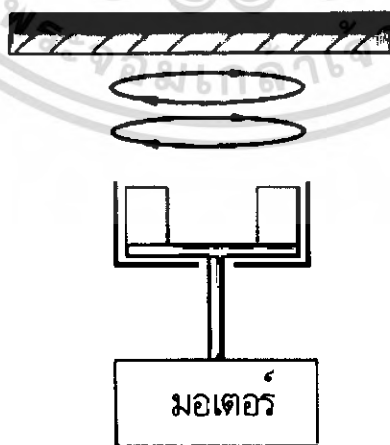
รูป 2.8 ความหลากหลายของชนิดพื้นผิวที่อุปกรณ์อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนทำงานได้ [8]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ข้อแตกต่างของระบบดูดแบบกระแสไหลวนและระบบทั่วไป

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำงานของอุปกรณ์ดูดในเครื่องดูดฝุ่นตามบ้านแล้วถึงแม้ว่าทั้งสองระบบนี้จะใช้ระบบใบพัดเหมือนกันแต่จุดประสงค์และลักษณะที่เกิดขึ้นจะต่างออกไป อย่างแรกคือ ใบพัดของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนไม่ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อดูดอากาศเข้าออกเหมือนกับใบพัดเครื่องดูดฝุ่นดังรูป 2.9 แต่ถูกออกแบบมาเพื่อรักษาสภาพความดันต่ำภายในระบบและลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกให้มากที่สุด โดยรักษาสภาพแบบนี้มีข้อดี คือ ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมวลอากาศน้อย เนื่องจากไม่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนอากาศผ่านระบบหรือพลังงานที่ใช้เพียงเพื่อรักษาการไหลวนของอากาศภายในกำแพงอากาศเท่านั้นดังรูป 2.10 ในทางกลับกันเครื่องดูดฝุ่นใช้พลังงานสูงกว่าเพราะ อากาศถูกถ่ายเทเข้าออกอยู่ตลอดเวลา หมายความว่าพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนมวลอากาศจะถูกถ่ายเททั้งออกจากระบบตลอดเวลาเช่นกัน จากเหตุนี้ส่งผลให้การ ใช้พลังงานของระบบการดูดอากาศทั่วไปมากกว่า



รูป 2.9 แสดงเส้นทางเดินของอากาศขณะผ่านใบพัดเครื่องดูดอากาศทั่วไป



รูป 2.10 แสดงเส้นทางเดินของอากาศในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้อุปกรณ์คูคระแสไหลวนถูกแยกจากผนัง ความดันในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มส่งผลให้การไหลพลังงานในการรักษาสภาพของใบพัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศภายนอกเริ่มเข้ามาบรรจบระบบ แต่ถึงอย่างไรการไหลพลังงานของระบบนี้ยังน้อยกว่าอุปกรณ์คูคอากาศทั่วไปอยู่ดี เนื่องจากกำแพงอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะคอยป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้ามา เมื่อเทียบกับการไหลเข้าออกของมวลอากาศตลอดเวลาของอุปกรณ์คูคอากาศทั่วไป พลังงานที่ใช้เพื่อรักษาสภาพเสถียรของระบบเทียบกับระบบทั่วไปพบว่าระบบนี้จะใช้น้อยกว่ามาก

### 2.3 เปรียบเทียบลักษณะปรากฏการณ์ของอากาศภายในตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศที่มีการพัฒนาในด้านรูปร่าง ผ่านทางการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงความสำคัญขององค์ประกอบในอุปกรณ์

ในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นไปที่การอธิบายลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจากรูปแบบของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นแนวทางการออกแบบของระบบในแต่ละแบบเป็นเช่นไร โดยนำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยวิเคราะห์ หากแต่มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะแสดงความสำคัญขององค์ประกอบในอุปกรณ์แต่ละชิ้นเพื่อที่จะนำไปสู่การคิดค้นแนวทางใหม่ในการเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ในอนาคตต่อไป โดยทั้งนี้รูปแบบต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นมาแล้วทำการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ที่ความเร็วรอบของการหมุนของใบพัดที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีโดยมีผลดังนี้

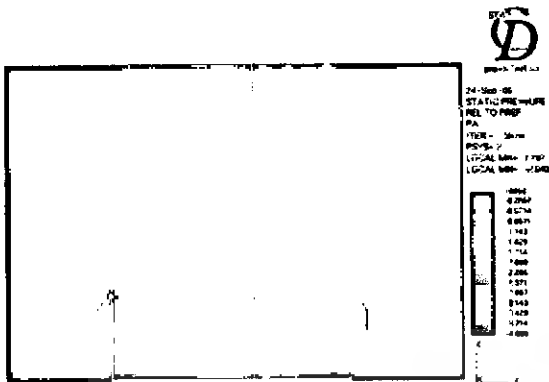
#### 2.3.1 อุปกรณ์ 1 กรณีที่ไม่มีใบพัดมีเฉพาะกรอบแหวนด้านข้างกับแผ่นหลัง (Containing ring and back plate)

ดังรูป 2.11 จะมีการไหลแบบวอร์เทกซ์แต่กำแพงวอร์เทกซ์ของอากาศจะมีความแข็งแรงไม่เท่าแบบทั่วไป สมรรถนะต่ำ และแรงดูดน้อยกว่ามาก ซึ่งจะเห็นได้จากการกระจายความดันของกำแพงอากาศ ดังรูป 2.12 ที่มีความดันติดลบหรือพื้นที่ที่สีเหลืองถึงเหลืองเข้มไม่มากนักซึ่งสอดคล้องกับข้อความข้างบนที่กล่าวไว้ว่าสมรรถนะต่ำ เมื่อเราทำการพลอตกราฟระหว่างค่าความแตกต่างความดันของความดันบรรยากาศและภายในอุปกรณ์กับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ดังในรูป 2.15 ซึ่งมาจากการสร้างสถานการณ์ตามขนาดและอุปกรณ์ตามรูป 2.14 พบว่า ค่าที่ได้บริเวณศูนย์กลางจะแตกต่างกับบริเวณกรอบด้านนอก เนื่องจากไม่มีใบพัดมาหมุนอากาศภายในและส่งผลให้ความแตกต่างความดันที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำเช่นกัน

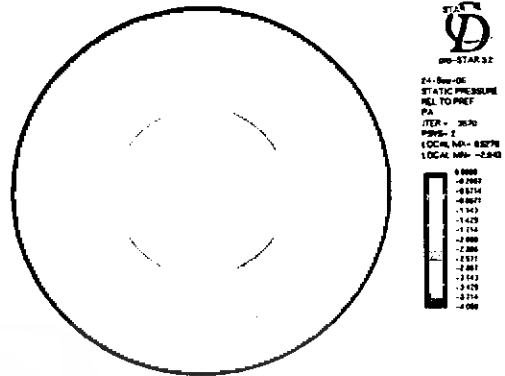


รูป 2.11 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



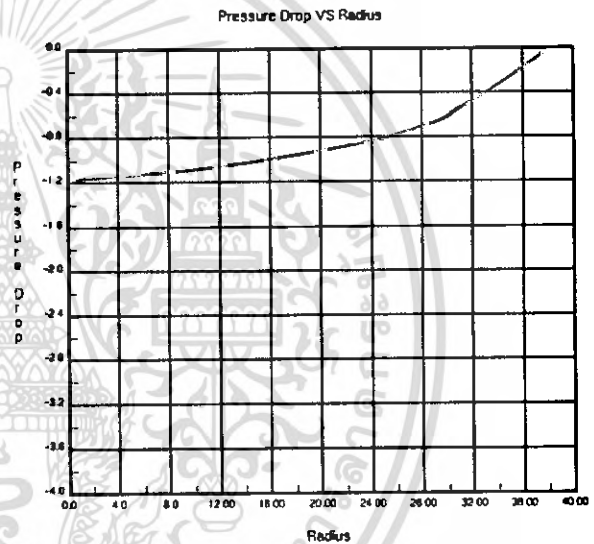
รูป 2.12 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง



รูป 2.13 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน



รูป 2.14 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น



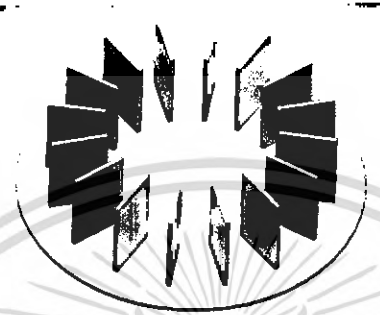
รูป 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)

### 2.3.2 อุปกรณ์ 2 กรณีที่ไม่มีกรอบแหวนด้านข้างของอุปกรณ์

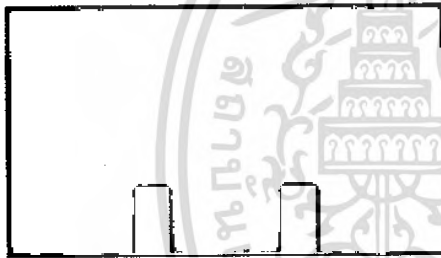
ดังรูป 2.16 เมื่ออากาศถูกเหวี่ยงออกไปโดยผ่านใบพัดออกไปรอบข้าง มวลอากาศบางส่วนจะถูกเหวี่ยงออกจากระบบ เหลือเพียงมวลอากาศบางส่วนยังอยู่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล สถานะของกำแพงอากาศที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างกระจายออกจากจุดศูนย์กลางมาก เนื่องจากไม่มีแหวนครอบคอยควบคุมทิศทางของกำแพง ดังนั้นกรณีนี้จะมีแรงดุดันที่คิดค้นที่ต่อเนื่องกันอยู่ใกล้ๆ หากอุปกรณ์อยู่ใกล้กันมากๆ กรอบแหวนจะไม่มีผลอย่างใด โดยรูปแบบนี้จะใช้พลังงานค่อนข้างสูงเพื่อรักษาภาพเสถียร และจากรูป 2.17 การกระจายความดันที่ได้มีพื้นที่ของความดันที่ลดลงแต่ความดันต่ำบริเวณใกล้กับขอบข้างมีพื้นที่ใหญ่ขึ้นเนื่องมาจากมวลอากาศถูกใบพัดเหวี่ยงโดยไม่ได้มีกรอบกำกับทิศทางส่งผลให้มวลอากาศรอบข้างได้รับพลังงานด้วยซึ่งสอดคล้องกับข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

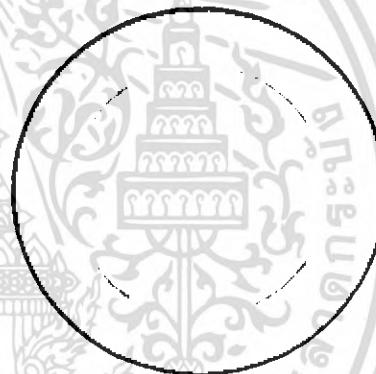
ความข้างต้น เมื่อเราทำการพลอตกราฟระหว่างค่าความแตกต่างความดันของความดันบรรยากาศและภายใน อุปกรณ์กับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ดังในรูป 2.20 ซึ่งมาจากการสร้างสถานการณ์ตาม ขนาดและอุปกรณ์ตามรูป 2.19 พบว่า ค่าที่ได้บริเวณศูนย์กลางจะแตกต่างกับบริเวณรอบด้านนอกไม่มาก เนื่องจากมีใบพัดมาหมุนอากาศภายในแต่เพราะไม่มีฝาครอบทำให้เกิดการรั่วของอากาศภายในบริเวณอุปกรณ์สู่บริเวณ ภายนอกส่งผลให้ความแตกต่างความดันที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำเช่นกัน



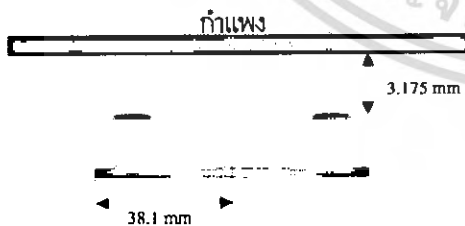
รูป 2.16 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 2



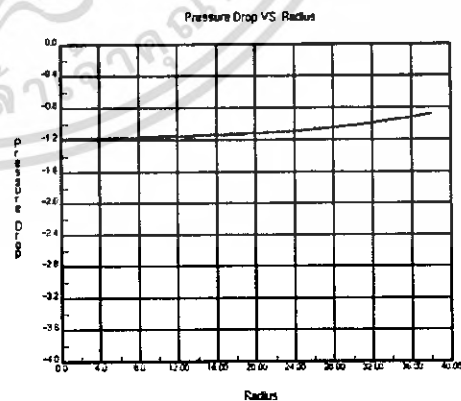
รูป 2.17 แสดงการกระจาย ความดันในมุมมองด้านข้าง



รูป 2.18 แสดงการกระจาย ความดันในมุมมองด้านบน



รูป 2.19 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น



รูป 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุด ศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)

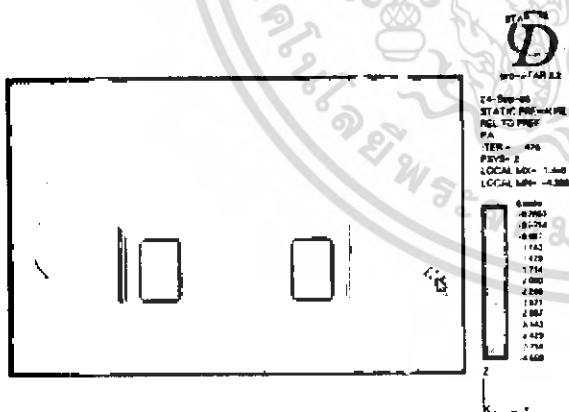
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 อุปกรณ์ 3 กรณีไม่มีแผ่นหลัง (Backplate)

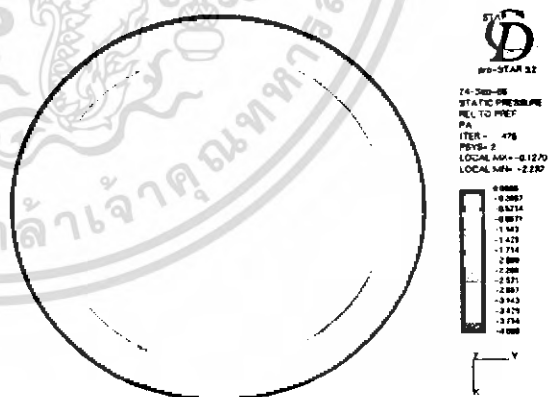
ดังรูป 2.21 จากเหตุนี้ส่งผลให้เกิดการไหลวนของอากาศเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างพร้อมกัน แต่ความแตกต่างของความดันภายในระบบและนอกระบบจะมีค่าลดลง ถึงอย่างไรก็ตามจะยังมีแรงดูดอยู่แต่น้อยกว่าแบบที่มีแผ่นหลัง รูปแบบนี้เราอาจจะนำมาใช้เพื่อต้องการวัดหรือสังเกตการณ์ทำงานของอุปกรณ์ และจากรูป 2.22 จะเห็นได้ถึงพื้นที่ที่ความดันติดลบเป็นสีเขียวเท่านั้นแสดงถึงความดันติดลบที่มีค่าน้อยซึ่งสอดคล้องกับข้อความข้างต้น เมื่อเราทำการพลอตกราฟระหว่างค่าความแตกต่างความดันของความดันบรรยากาศและภายในอุปกรณ์กับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ดังในรูป 2.25ซึ่งมาจากการสร้างสถานการณ์ตามขนาดและอุปกรณ์ตามรูป 2.24 พบว่าความแตกต่างความดันมีค่าสูงถึงแม้ว่าจะไม่มีฝาครอบด้านล่างด้วยเหตุที่ว่าไม่มีการกระจายของอากาศด้านข้างเนื่องจากมีฝาครอบคอบป้องกันไว้



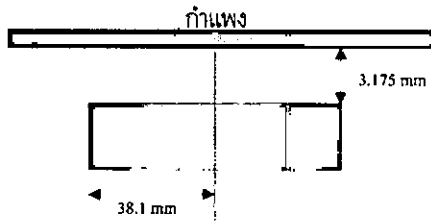
รูป 2.21 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 3



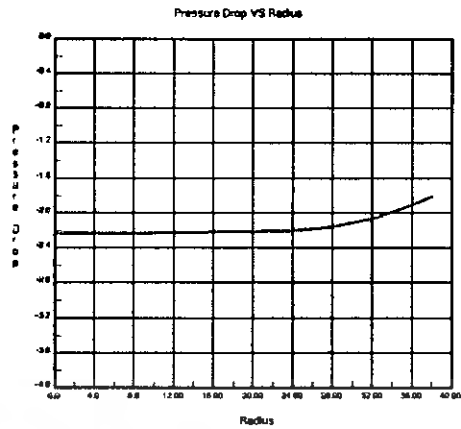
รูป 2.22 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง



รูป 2.23 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน



รูป 2.24 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น

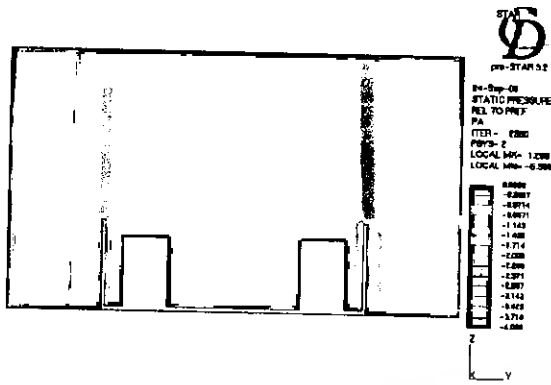


รูป 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่ จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)

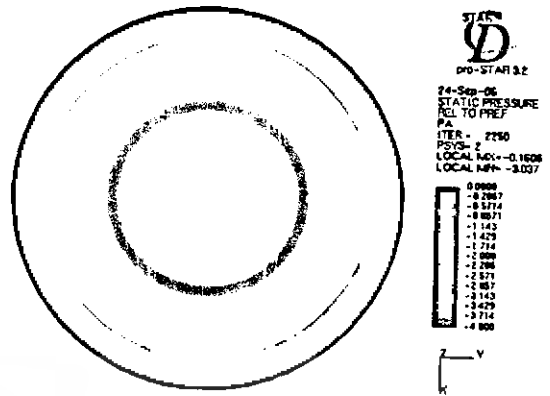
2.3.4 อุปกรณ์ 4 กรณีมีครบทุกส่วน ดังรูป 2.26 ในกรณีนี้กำแพงวอร์เทจจะแข็งแรงที่สุดเนื่องจากมีองค์ประกอบครบ ทั้งนี้ลักษณะของการไหลวนของมวลอากาศจะเหมือนกลับที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อหลักการ ทำงานเบื้องต้นแล้ว โดยจะสังเกตเห็นได้จากรูป 2.27 จะมีพื้นที่ของความดันติดลบหรือพื้นที่ในย่านสีฟ้าเข้มค่อนข้างใหญ่และก่อตัวเป็นกำแพงอากาศอย่างเห็นได้ชัด เนื่องด้วยพื้นที่สีของการกระจายความดันมีไม่มากนักซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการขับเคลื่อนมวลอากาศเฉพาะที่ส่งผลให้ใช้กำลังน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับข้อความในหัวข้อหลักการ ทำงานเบื้องต้นแล้ว เมื่อเราทำการพลอตกราฟระหว่างค่าความแตกต่างความดันของความดันบรรยากาศและภายในอุปกรณ์กับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ดังในรูป 2.30 ซึ่งมาจากการสร้างสถานการณ์ตามขนาดและอุปกรณ์ตามรูป 2.29 โดยรูปแบบนี้คือรูปแบบที่สมบูรณ์ซึ่งผลของค่าความแตกต่างความดันโดยรวมจะแสดงให้เห็นว่ามีค่าที่ได้สูงสุดในบรรดา 4 กรณีเนื่องจากมีส่วนประกอบในอุปกรณ์ที่คอยป้องกันและรักษาความเสถียรภายในไว้เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นฝาครอบด้านข้างและด้านล่าง อีกทั้งมีใบพัดคอยขับเคลื่อนอากาศภายในอุปกรณ์เพื่อให้ความเร็วของอากาศสูงขึ้นและความแตกต่างความดันที่สูงขึ้น



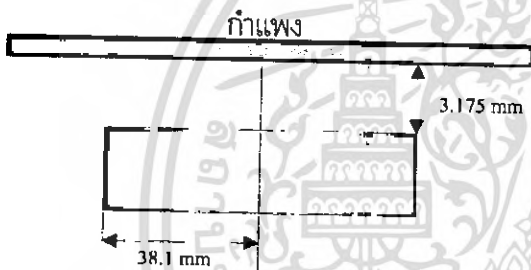
รูป 2.26 แสดงรูปแบบของกรณีที่ 4



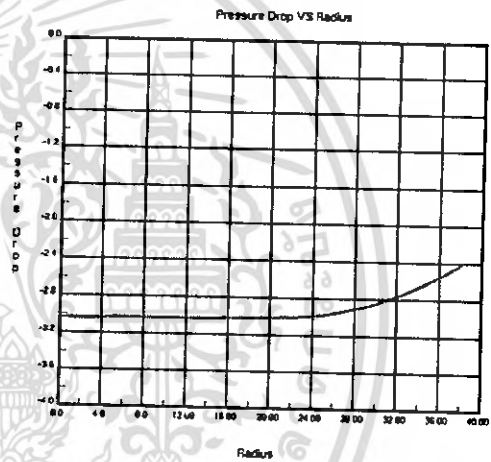
รูป 2.27 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านข้าง



รูป 2.28 แสดงการกระจายความดันในมุมมองด้านบน



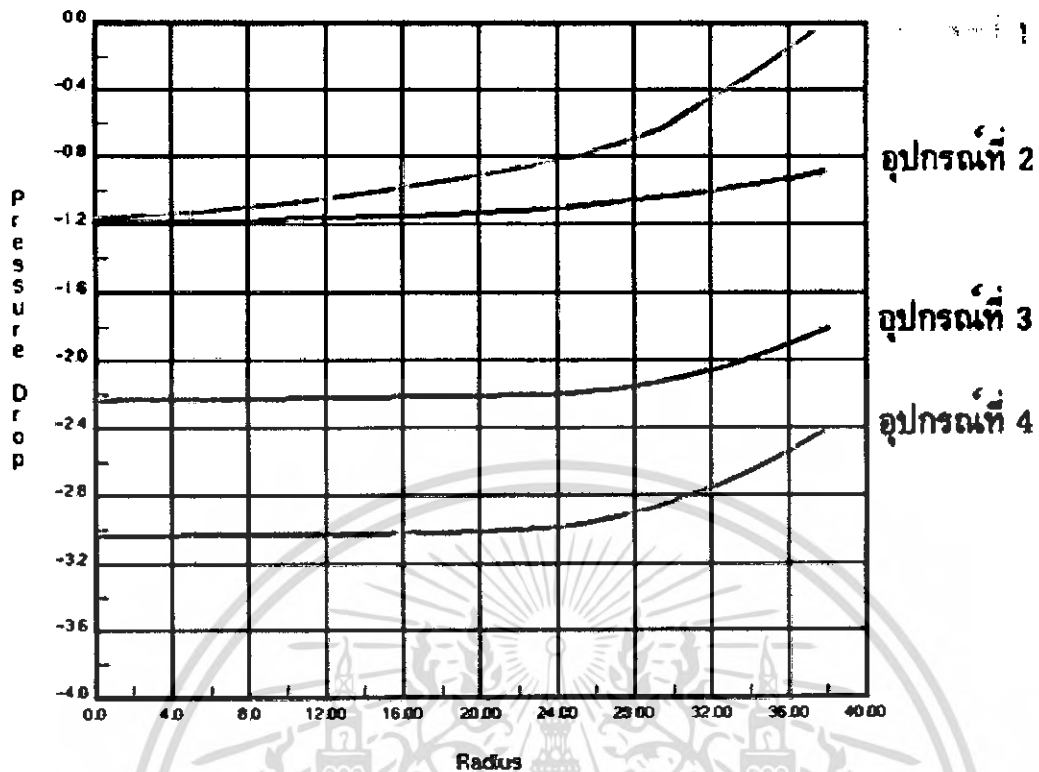
รูป 2.29 รูปแบบของสถานการณ์ที่สร้างขึ้น



รูป 2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring)

72066

Pressure Drop VS Radius



รูป 2.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) ของแต่ละกรณี

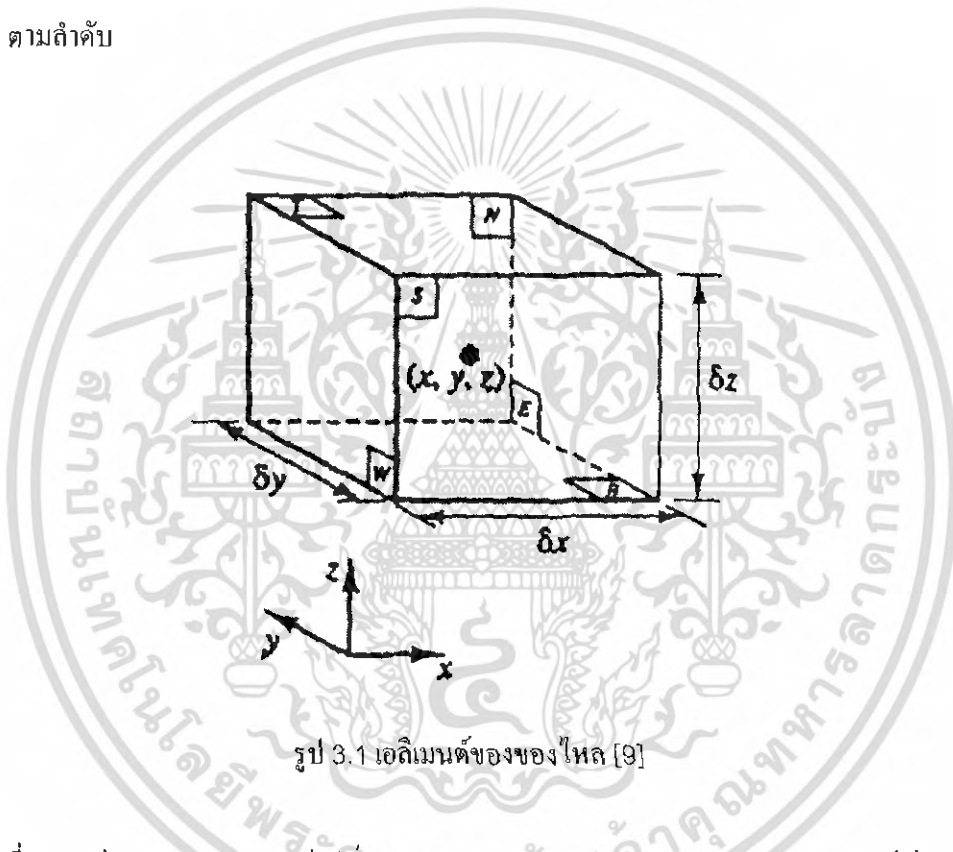
หลังจากทำการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ออกมาเป็น 4 กรณีแล้ว เราจะสามารถเห็นค่าความแตกต่างความดันที่ได้ในแต่ละกรณีจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันกับระยะตั้งแต่จุดศูนย์กลางถึงกำแพง (Containing ring) จากกราฟเหล่านี้จะเป็นสิ่งที่บอกความสามารถในการดูดหรือแรงดูดโดยรวมของแต่ละกรณี ทั้งนี้เมื่อนำกราฟทั้ง 4 กรณีนี้มารวมกันอยู่ในรูปเดียวเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถของการยึดติด เราจะพบว่าในกรณีที่ 1 และ 2 ค่าความแตกต่างความดันโดยเฉลี่ยมีค่าน้อยทำให้เราพบว่าปัจจัยทางด้านใบพัดและกรอบด้านข้างซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการสร้างความแตกต่างความดันของอุปกรณ์ชิ้นนี้ ส่วนในด้านของแผ่นหลังจะมีความสำคัญน้อยตามลงมา ตามกรณีที่ 3 จะเห็นว่าแม้จะขาดแผ่นหลังไปแต่หากมีใบพัดและกรอบด้านข้างค่าความแตกต่างของความดันก็จะเกิดขึ้นในระดับหนึ่งซึ่งสูงกว่ากรณีแรก ทั้งนี้หากมีอุปกรณ์ทุกส่วนครบดังในกรณีที่ 4 ก็จะทำให้เกิดสภาวะการไหลเวียนของมวลอากาศภายในที่สมบูรณ์ที่สุด โดยส่งผลต่อค่าความแตกต่างความดันที่มีค่าสูงที่สุดต่อมา

## บทที่ 3

# ทฤษฎีพื้นฐานและการวิเคราะห์อุปกรณ์สร้างแรงดูด กระแสไหลวน

### 3.1 สมการพื้นฐานของการไหล [9]

กำหนดให้เอลิเมนต์ของของไหลมีขนาด  $\delta x, \delta y, \delta z$  ดังแสดงในรูป 3.1 แต่ละผิวหน้าของเอลิเมนต์กำหนดชื่อดังนี้ N, S, E, W และ T ซึ่งหมายถึงผิวหน้าที่อยู่ด้านทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ด้านบน และด้านล่าง ตามลำดับ



รูป 3.1 เอลิเมนต์ของของไหล [9]

โดยที่จุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์อยู่ที่ตำแหน่ง  $(x, y, z)$  คุณสมบัติต่างๆ ของเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาดังนี้  $\rho(x, y, z), P(x, y, z, t), T(x, y, z, t)$  และ  $u(x, y, z)$  ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็วของเอลิเมนต์ตามลำดับเนื่องจากเอลิเมนต์ที่พิจารณานี้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นคุณสมบัติที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์ตามลำดับเนื่องจากเอลิเมนต์ที่พิจารณานี้มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นคุณสมบัติที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์จึงสามารถแสดงในรูปของสองเทอมแรกของ Taylor series ก็มีความถูกต้องเพียงพอ ยกตัวอย่างเช่น ความดันที่ผิวหน้า E และ W ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์เท่ากับ  $\delta x/2$  ทั้งคู่ ซึ่งแสดงค่าของความดันที่ผิวหน้าทั้งสองได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

ในลำดับแรกของการสร้างอนุพันธ์ของสมการอนุรักษ์มวลนั้นต้องทำการสมดุลมวลของเอลิเมนต์ของของไหลก่อนดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้ามาในเอลิเมนต์ของไหล

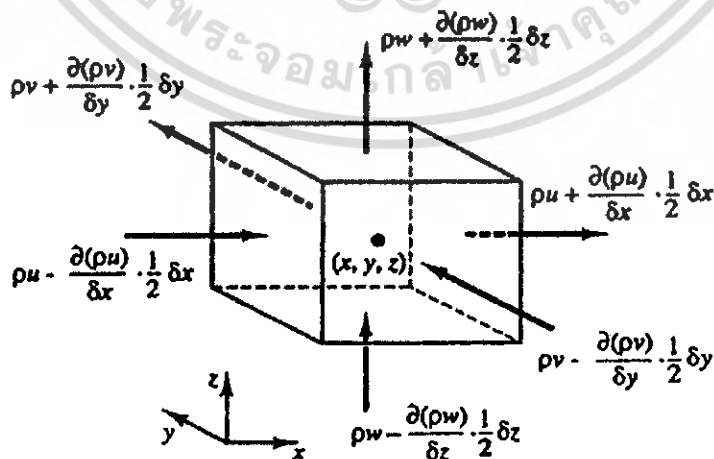
โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์คือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t}(\delta x \delta y \delta z) \quad (3.2)$$

สำหรับอัตราการไหลของมวลผ่านผิวหน้าของเอลิเมนต์แสดงในรูปของผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่ และองค์ประกอบของความเร็ว (Velocity component) ที่ตั้งฉากกับผิวนั้น จากรูป 3.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลเข้าเอลิเมนต์โดยผ่านพื้นผิวคือ

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (3.3)$$

การไหลที่มีทิศทางไหลเข้าสู่เอลิเมนต์ทำให้มวลของเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นแสดงในเครื่องหมายบวก ส่วนการไหลที่มีทิศทางไหลออกจากเอลิเมนต์แสดงในเครื่องหมายลบ



รูป 3.2 การไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ของของไหล [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.1 จะได้ว่าสมการที่ 3.2 เท่ากับสมการที่ 3.3 และเมื่อจัดเรียงสมการใหม่พร้อมกับหารทั้งสองข้างของสมการด้วย  $\delta x \delta y \delta z$  จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

สมการที่ 3.4 เป็นสมการอนุรักษ์มวลสามมิติแบบไม่คงตัว (Unsteady, Three-dimensional mass conservation) หรือ Continuity equation สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) เทอมแรกของสมการด้านซ้ายมือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ต่อเวลา ส่วนเทอมที่เหลือของสมการด้านซ้ายมือนั้นแสดงการไหลออกสุทธิของมวลผ่านผิวหน้าซึ่งเป็นขอบเขตของเอลิเมนต์ ซึ่งรวมเรียกว่า คอนเวกทีฟเทอม (Convective term)

สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) นั้นความหนาแน่นคงที่ สมการที่ 3.4 จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

### 3.1.2 สมการโมเมนตัม

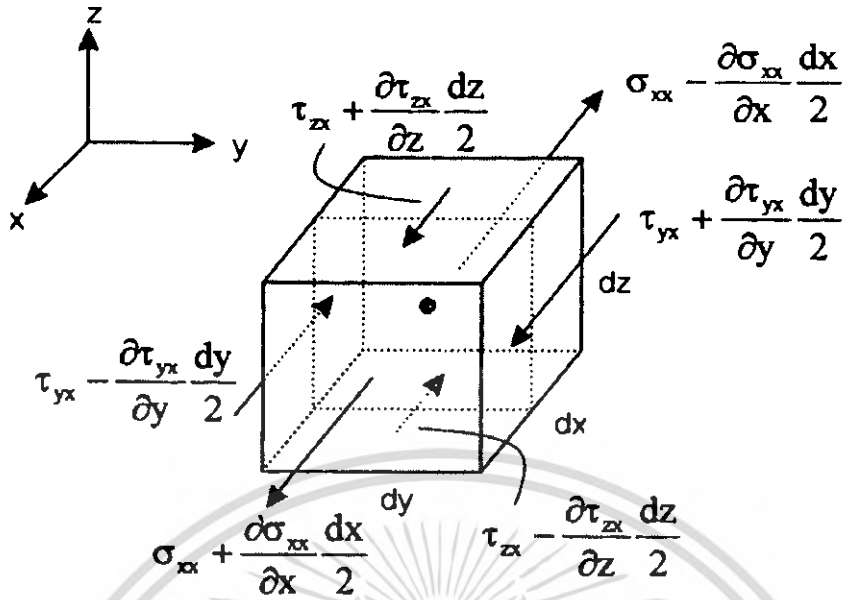
จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคไหลเท่ากับผลบวกของแรงที่กระทำต่ออนุภาคนั้น ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในทิศทาง  $x, y, z$  ของอนุภาคของไหลแสดงโดย

$$\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt} \text{ และ } \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.6)$$

เราสามารถแบ่งแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลออกได้เป็นสองประเภทด้วยกล่าวคือ

- แรงที่กระทำต่อพื้นผิว ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน (Pressure force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force)
- แรงที่กระทำต่อ Body ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal force), Coriolis force, Electromagnetic force

โดยปกติแล้วแรงที่กระทำต่อพื้นผิวจะแยกเป็นเทอมหนึ่งของสมการโมเมนตัม ส่วนแรงที่กระทำต่อ Body นั้นเป็นอีกเทอมที่แสดงในรูปของ Source term สำหรับความเค้นของเอลิเมนต์ของไหลถูกกำหนดในเทอมของความดันและความเค้นเฉือนแสดงในรูป 3.3 ความดันซึ่งได้แก่ความเค้นฉาก (Normal stress) ถูกแสดงโดย  $P$



รูป 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนพื้นผิวทั้งหกด้านของเอลิเมนต์ของไหล [9]

ความเค้นเฉือนถูกแสดงโดย  $\tau$  โดยปกติแล้วแสดงในรูปของ  $\tau_{ij}$  โดยที่  $j$  แสดงว่าองค์ประกอบของความเค้นกระทำในทิศทาง  $j$  ต่อพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง  $i$

แรงที่กระทำต่อของไหลเนื่องจากความเค้นที่พื้นผิวทั้งหมดเท่ากับผลรวมของแรงสุทธิที่กระทำในทิศทาง  $x, y, z$  รวมกันซึ่งเท่ากับ

$$\delta F_{xx} = \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z \tag{3.7 ก}$$

$$\delta F_{yy} = \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z \tag{3.7 ข}$$

$$\delta F_{zz} = \left( \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \tag{3.7 ค}$$

$$\delta F_s = \delta F_{xx} \hat{i} + \delta F_{yy} \hat{j} + \delta F_{zz} \hat{k} \tag{3.8}$$

สำหรับแรงที่กระทำต่อ Body นั้นเราจะสนใจเพียงแต่แรงที่มาจากน้ำหนักของเอลิเมนต์เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\delta F_b = (\delta m)g \tag{3.9}$$

โดยที่แรงสุทธิทั้งหมดที่กระทำต่อเอลิเมนต์จะเกิดจากผลรวมระหว่างแรงที่กระทำต่อพื้นผิวกับ แรงที่กระทำต่อ Body ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

$$\delta F = \delta F_s + \delta F_b$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัมในส่วนของ  $x, y, z$  หาได้จากการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม  $x$  ของอนุภาคของไหลเท่ากับแรงทั้งหมดในทิศทาง  $x$  ที่กระทำต่อเอลิเมนต์เนื่องจากความเค้นที่ผิวรวมกับอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม  $x$  เนื่องจาก Source โดยแสดงดังต่อไปนี้

X-component: 
$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.10 \text{ ก})$$

Y-component: 
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (3.10 \text{ ข})$$

Z-component: 
$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \quad (3.10 \text{ ค})$$

และสามารถเขียนให้สั้นลงเป็น

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \tau \quad (3.11)$$

สมการที่ 3.11 เป็นสมการ โมเมนตัมเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของอนุพันธ์ ซึ่งสามารถบรรยายความหมายทางกายภาพได้เป็น สมการกฎข้อที่สองของนิวตันต่อหน่วยปริมาตร โดยที่ด้านซ้ายมือของเครื่องหมายเท่ากับคือ ผลคูณของมวลต่อหน่วยปริมาตรกับความเร่ง และทางด้านขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะเป็นแรงลัพธ์ของแรงวัตถุต่อหน่วยปริมาตรกับแรงจากผิวต่อหน่วยปริมาตร

### 3.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ Navier-Stokes

ในกรณีของไหลเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน ค่าความเค้นที่เกิดจากผลของความหนืดจนแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเค้นเชิงมุม ค่าความเค้นเหล่านี้จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความแตกต่างของความเร็วเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.12 \text{ ก})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.12 \text{ ข})$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.12 \text{ ค})$$

$$\sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3} \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.13 \text{ ก})$$

$$\sigma_{yy} = -p - \frac{2}{3} \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.13 \text{ ข})$$

$$\sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3} \mu \bar{\nabla} \cdot \bar{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.13 \text{ ค})$$

เมื่อนำเอาความสัมพันธ์ขอค่าความเค้นกับค่าความแตกต่างของความเร็ว ในสมการที่ 3.12 และ 3.13 กลับไปแทนค่าในสมการที่ 3.10 จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \bar{\nabla} \cdot \bar{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (3.14 \text{ ก})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \bar{\nabla} \cdot \bar{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (3.14 \text{ ข})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \bar{\nabla} \cdot \bar{V} \right) \right] \quad (3.14 \text{ ค})$$

สมการที่ 3.14 จะเรียกเป็นสมการนาเวียร์-สโตก (Navier Stokes equation) และหากนำสมการดังกล่าวไปใช้กับของไหลเฉพาะที่เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้และมีค่าความหนืดคงที่ สมการที่ 3.14 จะสามารถลดรูปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.15 \text{ ก})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.15 \text{ ข})$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.15 \text{ ค})$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลจำเพาะในสมการที่ 3.15 จะเขียนใหม่ให้สั้นลงเป็น

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.16)$$

### 3.1.4 สมการ Euler สำหรับการไหลไร้ความหนืด

ในของไหลจริงทุกชนิดต่างต้องมีความหนืด แต่อย่างไรก็ดีในปัญหาการไหลจำเพาะหลายแบบ จะพบว่าสามารถทำการวิเคราะห์การไหลโดยละทิ้งผลของความหนืดได้ และยังได้ผลเฉลยที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย ในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การไหลภายใต้เงื่อนไขไร้ความหนืด ซึ่งบางทีจะเรียกการไหลดังกล่าวว่า การไหลอุดมคติ

ในกรณีของการไหลไร้ความหนืด จะสามารถเขียนสมการที่ 3.14 หรือสมการที่ 3.15 ซึ่งอ้างอิงกับแกนพิกัด  $xyz$  ใหม่โดยละทิ้งเทอมที่เกี่ยวข้องกับความเค้นเฉือนได้เป็น

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.17 \text{ ก})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.17 \text{ ข})$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.17 \text{ ค})$$

และสมการการเคลื่อนที่ของของไหลไร้ความหนืดที่อ้างอิงกับแกนพิกัด  $r\theta z$  จะเขียนได้เป็น

$$\rho \left( \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} \right) = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.18 \text{ ก})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} \right) = \rho g_\theta - \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (3.18 \text{ ข})$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.18 \text{ ค})$$

สมการที่ 4.17 และ 4.18 จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเวกเตอร์เพียงสมการเดียวเป็น

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \vec{V} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} p \quad (3.19)$$

สมการเคลื่อนที่ของการไหลไร้ความหนืดดังที่แสดงเป็นสมการที่ 3.19 นี้จะเรียกว่า สมการ Euler

### 3.1.5 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation)

เมื่อนำสมการ Euler มาใช้กับอนุภาคของของไหลที่เคลื่อนที่อยู่บนเส้น Streamline และพัฒนาต่อมาจะได้สมการใช้งานสำหรับของไหลไร้ความหนืดที่เป็นที่นิยม ที่เรียกว่า สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) ซึ่งมีเงื่อนไขของการใช้สมการคือ

1. การไหลจะต้องเป็นการไหลไร้ความหนืด
2. การไหลเป็นการไหลแบบคงตัว
3. การไหลเป็นการไหลอัดตัวไม่ได้
4. สมการใช้กับอนุภาคของของไหลที่อยู่บน Streamline เส้นเดียวกัน

และสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \gamma z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \gamma z_2 \quad (3.20)$$

### 3.1.6 การไหลแบบ Vortex

การไหลแบบ vortex เป็นการไหลในลักษณะที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม ซึ่งการเคลื่อนที่ของของไหลในลักษณะ vortex นี้จะสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือการไหลแบบ free vortex และการไหลแบบ forced vortex ถึงแม้ว่าการไหลแบบ vortex จะเป็นการไหลแบบหมุนวนแต่อนุภาคของของไหลอาจเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยไม่มีการหมุนก็ได้ การเคลื่อนที่แบบ free vortex จะเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะที่เป็นการไหลแบบไม่หมุนวน (irrotational flow) ซึ่งจะให้อัตราความเร็วในแกนพิกัด  $r\theta$  เป็น  $V_r = 0$ ,  $V_\theta = K/r$  ในกรณีที่ free vortex ดังกล่าวนั้นหมุนอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทฤษฎีของเข็มนาฬิกา ซึ่งค่าความเร็วของ free vortex นี้จะมีลักษณะที่ความเร็วของการไหลลดลงเมื่อมีระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลาง และมีจุด singularity อยู่ที่จุดศูนย์กลาง ในขณะที่ vortex อีกชนิดที่เรียกว่า forced vortex นั้นจะเป็นการหมุนในลักษณะที่ตัวอนุภาคเองมีการหมุนในตัวเอง จึงเป็นการไหลแบบหมุน (rotational flow) ค่าความเร็วของ vortex แบบนี้คือ  $V_r = 0$ ,  $V_\theta = \Omega r$  ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแต่การไหลที่เป็นการไหลแบบหมุน (irrotational flow) อันเนื่องจากอุปกรณ์สร้างแรงคูลกระแสไหลวนเป็นการไหลแบบ forced vortex ซึ่งจากนิยามของค่าสตรีมฟังก์ชันและค่า velocity potential จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$V_\theta = \Omega r = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}$$

ซึ่งเมื่ออินทิเกรตจะได้

$$\psi = -\Omega \frac{r^2}{2} \quad (3.21)$$

$$\phi = -\Omega r^2 \theta \quad (3.22)$$

และจากนิยามของค่า Circulation  $\Gamma$  ที่กำหนดให้เป็นค่าอินทิกรัลรอบเส้นโค้งของความเร็วของของไหลในแนวสัมผัสในระนาบการไหล ซึ่งจะแสดงได้เป็น

$$\Gamma = \int \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad (3.23)$$

ดังนั้นหากนำมาใช้กับ forced vortex ที่มีจุดกำเนิดอยู่ในเส้นโค้งปิด จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} V_\theta r d\theta$$

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} (\Omega r) r d\theta$$

$$\Gamma = 2\pi \Omega r^2$$

ดังนั้น

$$\Omega = \frac{\Gamma}{2\pi r^2} \quad (3.24)$$

ค่า  $\psi$  และ  $\phi$  ของการไหลแบบ Vortex ซึ่งหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาในสมการที่ 1 และ 2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\psi = -\frac{\Gamma}{4\pi} \quad (3.25)$$

$$\phi = \frac{\Gamma}{2\pi} \theta \quad (3.26)$$

โดยที่ค่า  $\Gamma$  จะเรียกค่า Strength ของ vortex



รูป 3.4 แสดงการไหลแบบ forced vortex [3]

### 3.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลของอากาศอันเนื่องมาจากอุปกรณ์สร้างแรงดูดกระแสไหลวน

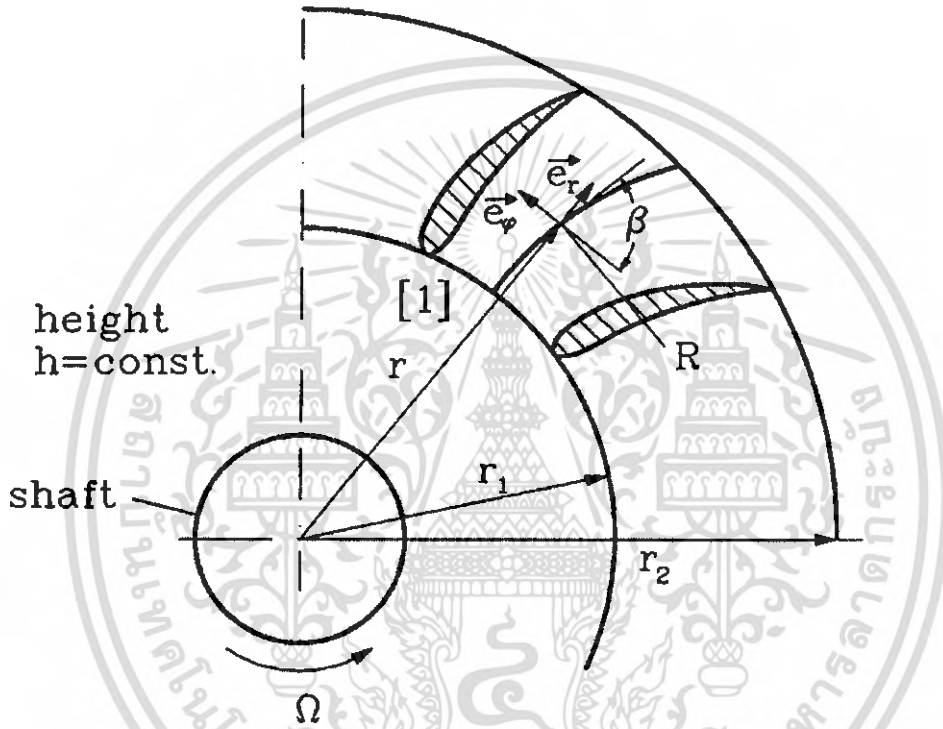
เนื่องจากมวลอากาศที่อยู่ภายในตัวอุปกรณ์ถูกใบพัดผลักดัน ส่งถ่ายพลังงานและเหวี่ยงมวลอากาศให้เกิดการเคลื่อนที่แบบกระแสไหลวน (Vortex flow) มวลอากาศเกิดการพากันหมุนวนขึ้นไปตามเส้นสายการไหลเกิดการก่อตัวขึ้นเป็นกำแพงอากาศนั้น เราสามารถแบ่งการวิเคราะห์การไหลออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนภายในตัวอุปกรณ์ (ขณะ โคนใบพัดส่งถ่ายพลังงาน) และส่วนกำแพงอากาศ

### 3.2.1 ปราบการไหลของมวลอากาศภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

#### 3.2.1.1 ทฤษฎีที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดความแตกต่างของความดัน (Pressure Drop)

สมมติ: เป็นสภาวะการไหลคงที่ (Steady State), ความหนาแน่นคงที่ (Incompressible Flow),  
ไม่มีความหนืด (Inviscid flow)

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ (The Navier-Stokes equations) และการเคลื่อนที่ของไหลในเฟรมอ้างอิงที่มีการหมุน ดังรูป 3.5



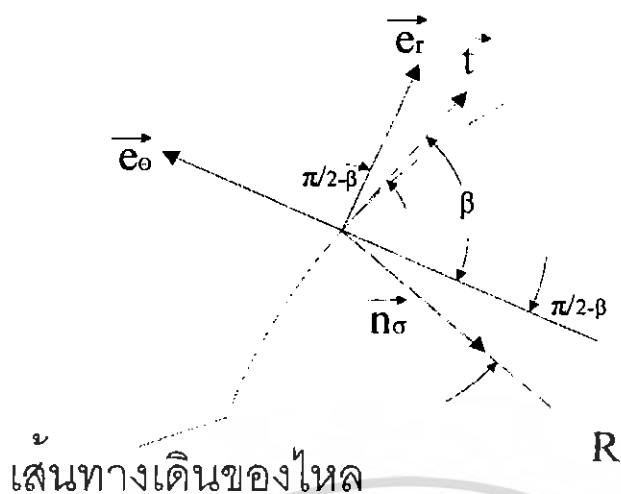
รูป 3.5 แสดงลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านใบพัด [5]

$$\rho \left( \frac{D\vec{w}}{Dt} \right)_A = -\nabla p + \vec{f} \quad (3.27)$$

โดยที่

$$\vec{f} = -\rho g \vec{e}_z - [2\rho \vec{\Omega} \times \vec{w} + \rho \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{x})]$$

ในที่นี้จะให้เวกเตอร์ของความเร่งอยู่ในพิกัดในแนวตั้งฉากและสัมผัสกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของไหล (Normal and tangential coordinate system) ดังรูป 3.6



รูป 3.6 แสดงทิศทางของเส้นทางการเดินของอากาศ

$$\frac{D(w\bar{t})}{Dt} = \left( \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \right) \bar{t} + \frac{w^2}{R} \bar{n}_\sigma$$

ดังนั้น

$$\rho \left( w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \bar{t} + \frac{w^2}{R} \bar{n}_\sigma \right) = -\nabla p + \bar{f}$$

จากพื้นฐานของเวกเตอร์ในพิกัดตั้งฉากและสัมพันธ์กับเส้นทางการเดินของไหล (The natural coordinate system) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{f} = f_\sigma \bar{t} + f_n \bar{n}_\sigma + f_b \bar{b}_\sigma$$

จากสมการออยเลอร์ (Euler's equation) ในพิกัดตั้งฉากและสัมพันธ์กับเส้นทางการเดินของไหล (the natural coordinate system)

$$\rho w \frac{\partial w}{\partial \sigma} = f_\sigma - \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (3.28)$$

$$\rho \frac{w^2}{R} = f_n - \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.29)$$

$$0 = f_b - \frac{\partial p}{\partial b} \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $\vec{w} = w\vec{i}$ ,  $\vec{\Omega} = \Omega\vec{e}_z$ ,  $\vec{x} = r\vec{e}_r$ ,

แรงทั้งหมดที่กระทำกับของไหล

$$\vec{f} = -\rho g\vec{e}_z - 2\rho\Omega w(\vec{e}_z \times \vec{i}) - \rho\Omega^2 r\vec{e}_z \times (\vec{e}_z \times \vec{e}_r)$$

โดยที่

$$(\vec{e}_z \times \vec{i}) = -\vec{n}_\sigma, \quad \vec{e}_z \times (\vec{e}_z \times \vec{e}_r) = \vec{e}_z \times \vec{e}_\theta = -\vec{e}_r, \quad \vec{e}_z = \vec{b}_\sigma$$

ดังนั้น

$$\vec{f} = +\rho g\vec{b}_\sigma + 2\rho\Omega w\vec{n}_\sigma + \rho\Omega^2 r\vec{e}_r$$

แตกแรงให้อยู่ในทิศทางของเส้นทางเดินของใบพัดดังรูป 3.6

$$f_\sigma = \vec{f} \cdot \vec{i} = \rho\Omega^2 r \sin \beta \quad (3.31)$$

$$f_n = \vec{f} \cdot \vec{n}_\sigma = 2\rho\Omega w - \rho\Omega^2 r \cos \beta \quad (3.32)$$

สังเกต: จะเห็นได้ว่าแรงคอริโอลิส (Coriolis force) มีอยู่เพียงในแกนตั้งฉากกับเส้นทางเดินของไหล (Normal direction to the pathline) เท่านั้น จากสมการ 3.28, 3.29, 3.31 และ 3.32 เราจะได้สมการของการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure gradient)

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = \rho\Omega^2 r \sin \beta - \rho w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (3.33)$$

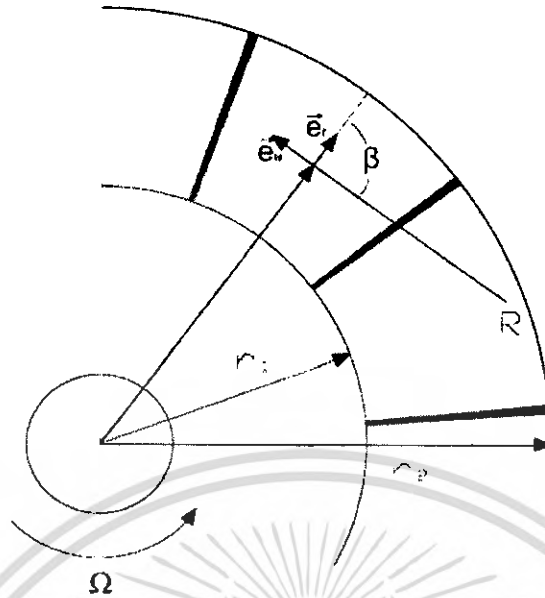
$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = 2\rho\Omega w - \rho\Omega^2 r \cos \beta - \rho \frac{w^2}{R} \quad (3.34)$$

ในกรณีของต้นแบบของอุปกรณ์สร้างแรงดูด ใบพัดมีรูปร่างเป็นเส้นตรงทำให้เส้นทางเดินของไหลเป็นเส้นตรงด้วย ดังนั้นมุม  $\beta = \frac{\pi}{2}$ ,  $R = \infty$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = \rho\Omega^2 r - \rho w \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = 2\rho\Omega w \quad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.7 แสดงพิกัดของเส้นทางการเดินของอากาศผ่านใบพัดตรง

เนื่องจากตอนนี้การไหลของของไหลที่ผ่านช่องของใบพัดได้เป็นทิศทางการแนวรัศมีดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางการเดินของของไหลจึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตามแนวรัศมีด้วย, จากสมการ 3.35 เราจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \Omega^2 r - \rho w \frac{\partial w}{\partial r} \quad (3.37)$$

จากการอินทิเกรตความดันตามเส้นของใบพัด ( $\theta = \text{const}$ ) ระหว่างรัศมีที่จุด 1 และ 2

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial p}{\partial r} dr = \int_{r_1}^{r_2} \rho \Omega^2 r dr - \int_{r_1}^{r_2} \rho w \frac{\partial w}{\partial r} dr \quad (3.38)$$

ดังนั้นจะได้ผลต่างของความดัน (Pressure Drop)

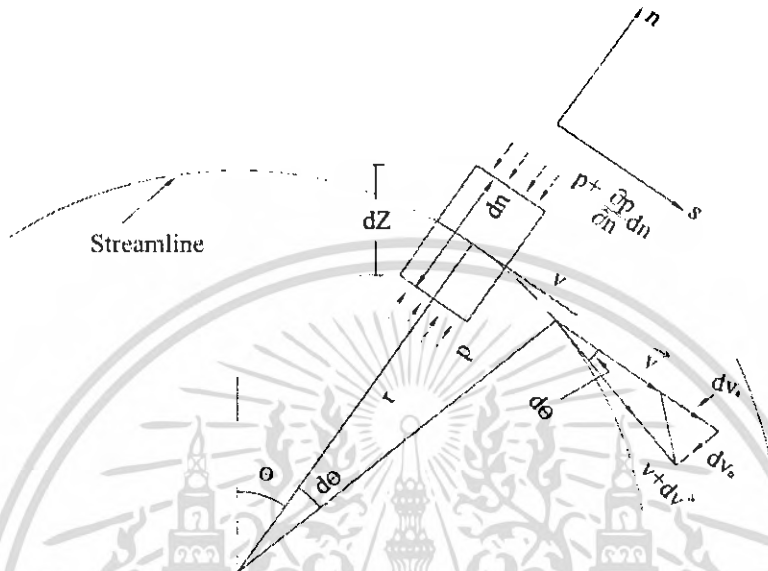
$$p_2 - p_1 = \rho \Omega^2 \left( \frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right) - \rho \left( \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \right) \quad (3.39)$$

จากสมการที่ 3.39 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความดันตามเส้นทางการเดินของไหล และความเร็วสัมผัสเข้าและออก ของ ณ ตำแหน่งระหว่างรัศมีจุดที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ปรากฏการณ์การไหลวนของมวลอากาศแบบเวอร์เทก (Vortex)

#### 3.2.2.1 การไหลแบบคงตัวตามเส้นสายธารการไหลแบบโค้ง



รูป 3.8 แสดงการไหลตามเส้นสายการไหล (Stream line)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอากาศที่เป็นแบบไม่มีความหนืด (inviscid) และอัดตัวไม่ได้ (incompressible) ใน 2 มิติ บนเพลาในแนวตั้งโดยความเร่งในแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหล (Streamline) ที่จุด 1 เป็น

$$a_n = \frac{dv_n}{dt}$$

โดยที่  $dv_n$  คือส่วนประกอบของการเปลี่ยนเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหล (Streamline) ดังนั้น

$$dv_n = v d\theta \quad (3.40)$$

$$a_n = \frac{dv_n}{dt} = v \frac{d\theta}{dt} = \frac{v^2}{r}$$

โดยที่  $r$  คือรัศมีของเส้นโค้งที่จุดที่ 1 ความเร่ง  $a_n$  กระทำในแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหล (Streamline) หรือคือ centripetal acceleration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหล (Streamline) สามารถเขียนสำหรับการไหลแบบคงตัวได้ดังนี้

$$\frac{v^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + g \cos \theta$$

โดยที่  $\frac{\partial p}{\partial n}$  คือ Pressure gradient ตามแนวเส้นตั้งฉากกับเส้นสายธารการไหล (Streamline) และให้ H เป็นพลังงานรวมต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (total head)

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad (3.41)$$

โดยที่ z คือความสูงในแนวตั้งของจุดจากจุดอ้างอิงของ datum เนื่องจากทฤษฎีของ Bernoulli's theorem, H จะคงที่ตามเส้นสายของ streamline สำหรับการไหลในอุดมคติ ไม่ว่าจะเป็นการไหลแบบหมุนได้ (rotational) หรือหมุนไม่ได้ (irrotational)

$$\frac{\partial H}{\partial s} = 0$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียล Differentiating Eq. (3.41) ด้วย n จะได้

$$\frac{\partial H}{\partial n} = \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial z}{\partial n} \quad (3.42)$$

แทน  $\frac{\partial p}{\partial n}$  จากสมการ 3.41 ลงในสมการ 3.42 จะได้

$$\frac{\partial H}{\partial n} = \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{v^2}{gr} + \left( \frac{\partial z}{\partial n} - \cos \theta \right)$$

$$\text{โดยที่ } \cos \theta = \frac{\partial z}{\partial n}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial H}{\partial n} = \frac{v}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{v}{r} \right) \quad (3.43)$$

สมการที่ 3.43 ในทางกายภาพแล้วได้บอกเป็นนัยว่า การเปลี่ยนแปลงของพลังงานรวมจะขึ้นอยู่กับทิศทางในแนวตั้งฉากกับเส้นสาย streamline สำหรับของไหลแบบไม่มี ความหนืด (inviscid) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 ระนาบของการไหลวนแบบเวอร์เทก (Plane circular Vortex Flows)

ระนาบของการไหลวนแบบเวอร์เทก เป็นการไหลที่ซึ่ง Streamline มีรูปร่างเป็นวงกลม โดยที่เป็นระบบพิกัดเชิงมุม (polar coordinate system) และจุดตรงกลางเป็นจุดกำเนิดซึ่งเราสามารถจำกัดความของสนามความเร็วได้ดังนี้

$$v_\theta \neq 0 \quad v_r = 0$$

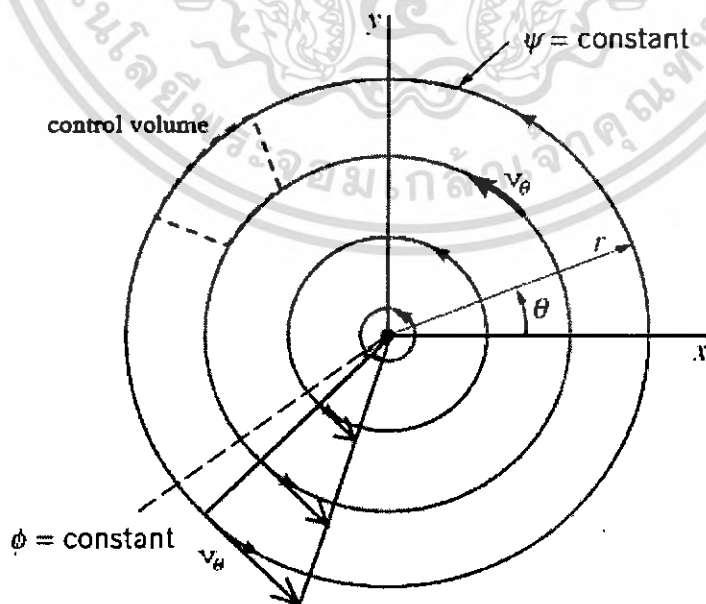
โดยที่  $V_\theta$  และ  $V_r$  คือส่วนประกอบความเร็วในแนวสัมผัสและแนวรัศมีตามลำดับ

ซึ่งจากสมการความต่อเนื่อง (The equation of continuity) สำหรับ 2 มิติ, ของไหลอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow) ในระบบพิกัดเชิงมุม

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0$$

จากระนาบของการไหลวนแบบเวอร์เทกจะได้  $\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0$  หรือความเร็วในแนวสัมผัสไม่เป็นฟังก์ชันหรือไม่ขึ้นกับ  $\theta$ , ดังนั้น  $v_\theta$  จะเป็นฟังก์ชันของ  $r$  เท่านั้น จากสมการที่ 3.43 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงของพลังงานร่วมกับรัศมีได้ดังนี้

$$\frac{dH}{dr} = \frac{v_\theta}{g} \left( \frac{dv_\theta}{dr} + \frac{v_\theta}{r} \right) \quad (3.44)$$



รูป 3.9 แสดงการไหลวนแบบบังคับ (Forced Vortex)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการไหลของมวลอากาศที่อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน (Vortex Attractor) นี้เป็นการไหลวนแบบบังคับ (Forced Vortex Flow) ซึ่งมีเส้นสายการไหล streamline เป็นวงกลมและความเร็วในแนวสัมผัสนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับรัศมีของเส้นโค้ง ซึ่งสามารถเขียนสมการความเร็วนี้ให้อยู่ในระบบ polar coordinate system ได้ดังนี้

$$v_\theta = \Omega r \quad (3.45)$$

$$v_r = 0 \quad (3.46)$$

โดยที่การไหลของ ชิ้นส่วนของของไหล (Particles fluid) มีการหมุนเกิดขึ้นได้ด้วยความเร็วเชิงมุมเดียวกับอุปกรณ์ ซึ่งการไหลวนแบบบังคับ Forced Vortex flow นี้เป็นเทอมเดียวกับการหมุนของอุปกรณ์ และ Vorticity,  $\zeta$  สำหรับสนามการไหลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\zeta = \nabla \times v = \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\theta}{r}$$

$$\zeta = \Omega - 0 + \Omega = 2\Omega \quad (3.47)$$

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของการไหลวนแบบบังคับ (Forced vortex) จะมีการหมุนเกิดขึ้นดังสมการที่ 3.47 และจากสมการที่ 3.44 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วเชิงมุมได้ดังนี้

$$\frac{\partial H}{\partial r} = \frac{v_\theta}{g} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{2\Omega^2 r}{g} \quad (3.48)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.48 จะได้

$$H_2 - H_1 = \frac{\Omega^2}{g} (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.49)$$

ซึ่งสมการที่ 3.49 นี้แสดงให้เห็นถึงพลังงานรวมต่อน้ำหนัก (Total head) จะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้น พลังงานรวม ณ ทุกจุดคือผลรวมของพลังงานจลน์ (Kinetic energy), งานของการไหล (Flow work) หรือ พลังงานของความดัน (Pressure energy) และพลังงานศักย์ (Potential energy) โดยที่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานรวมต่อน้ำหนัก ระหว่างจุด 2 จุดใดๆ ในระนาบเดียวกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H_2 - H_1 = \left[ \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} \right] + \left[ \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_2 - H_1 = \left[ \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} \right] + \frac{\Omega^2}{2g} (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.50)$$

แทนสมการ 3.50 ลงในสมการ 3.49 เราจะได้

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{\Omega^2}{2} (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.51)$$

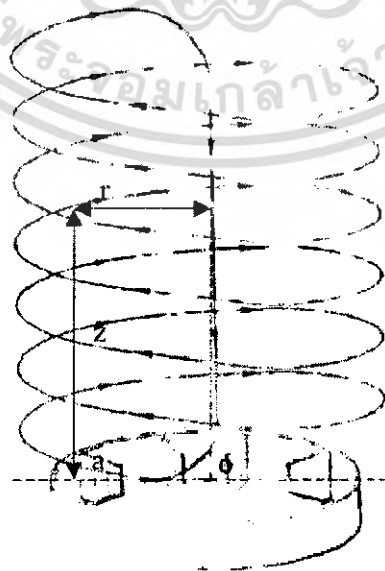
ในสมการ 3.51 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่โดยครัมมีได้ดังนี้

$$\int_1^2 \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} dr = \int_1^2 \frac{v^2}{r} dr = \Omega^2 \int_1^2 r dr$$

เพื่อรักษาการไหลหมุนวนแบบบังคับ (Forced vortex flow) พลังงานรวมจะต้องได้รับจากภายนอกและนั่นคือ แรงบิด (Torque) จึงจำเป็นตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง

เมื่อเรามองกำแพงอากาศเป็นการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ที่ทุกๆ ระนาบในแนวนอน ความเร็วในแนวสัมผัสก็คือสมการที่ 3.45, เสถียรภาพ (The pressure head,  $\frac{p}{\rho g}$ ) ที่ทุกจุดในของไหล (อากาศ) จะเท่ากับความลึก  $z$  ของจุดที่อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวอิสระหรือกำแพงนั่นเอง ซึ่งถ้าเขียนสมการ 3.51 ใหม่ให้อยู่ในรูปของเสถียรภาพระหว่างจุด  $a$  และ  $o$  ในระนาบแนวนอนเดียวกันจะได้

$$z - z_o = \frac{\Omega^2 r^2}{2g} \quad (3.52)$$



รูป 3.10 แสดงการไหลวนของกำแพงอากาศในแกน  $r$ - $z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวดูด

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้กำหนดเกณฑ์การวัดสมรรถนะในการบีดัดของตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศ กระแสไหลวนเป็นสมรรถนะแรงดูด หรือค่าของแรงดูดที่อุปกรณ์สร้างขึ้นได้หารด้วยน้ำหนักของอุปกรณ์ ดังสมการที่ 3.53 เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่จะทำการจำลอง ในบทที่ 6

$$\text{สมรรถนะแรงดูด} = \frac{F_{\text{adhesive}}}{W} = \frac{\int_0^r \Delta p 2\pi r dr}{W} \quad (3.53)$$



## บทที่ 4

### แนวทางการพัฒนาและออกแบบ

#### 4.1 ความสำคัญและที่มา

สำหรับอุปกรณ์สร้างแรงดูดกระแสไหลวนนั้น สิ่งที่จะบ่งชี้ถึงความสามารถของอุปกรณ์ได้ดีที่สุดนั่นคือความสามารถในการบิดคด หรือ แรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอุปกรณ์กับพื้นผิว และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแรงดูดนั้นมีอยู่หลายตัวแปร เช่น ความแตกต่างของความดันหรือแรงดันตกคร่อม (Pressure Drop), ความเร็วรอบ ( $\Omega$ ), จำนวนใบพัด, รูปร่างของอุปกรณ์, การสูญเสีย (Loss) และอื่นๆ

#### 4.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการบิดคดของอุปกรณ์โดยเน้นไปที่การลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันอากาศบริเวณปลายใบพัดกับกรอบของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

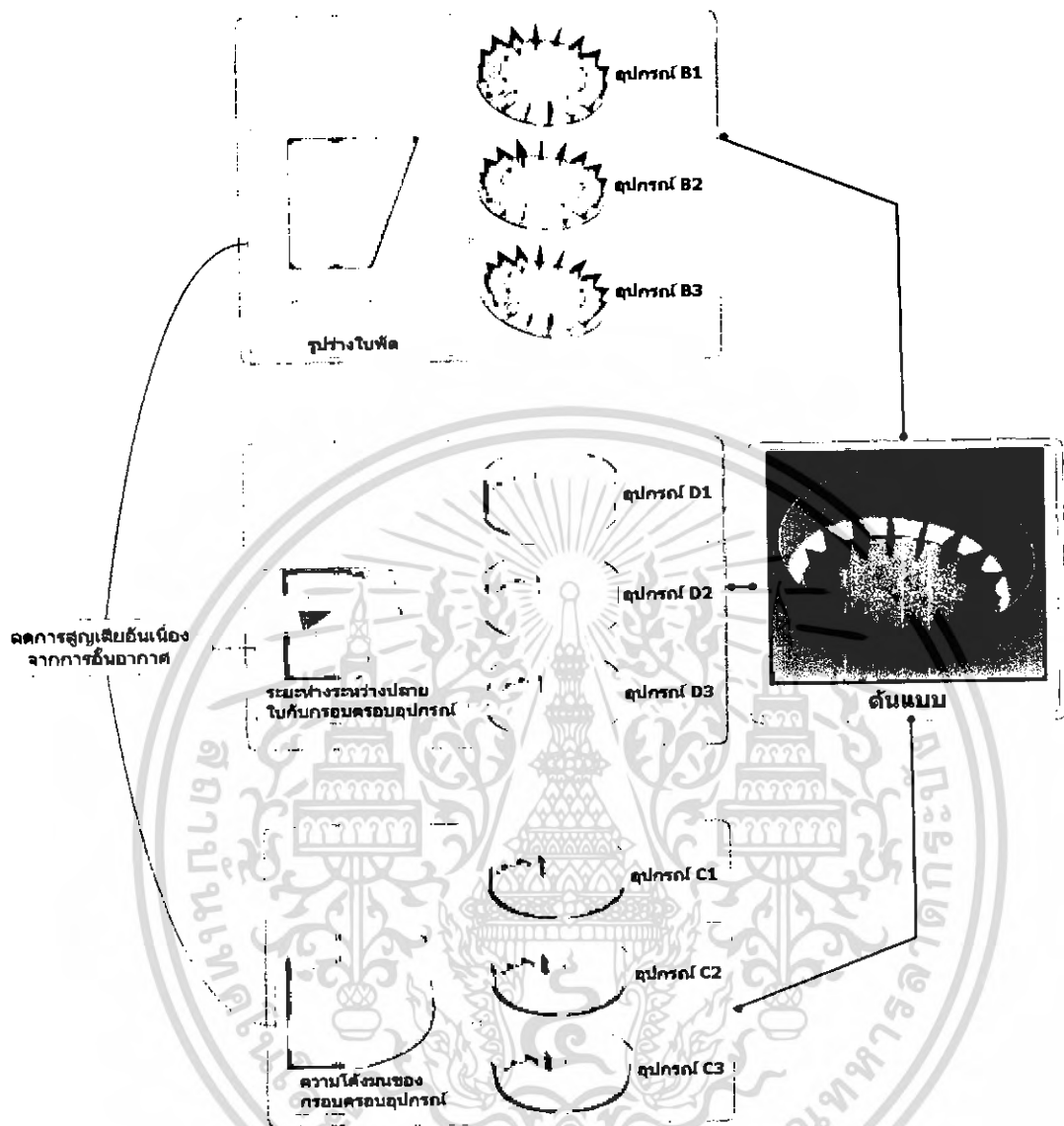
2. เพื่อทำการออกแบบต้นแบบสุดท้ายที่จะใช้เป็นแบบในการสร้างชุดทดลองจริง โดยโครงการนี้จะนำแนวความคิดในการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันของอากาศบริเวณปลายใบพัดกับกรอบอุปกรณ์ไปทำการจำลองการไหลเพื่อหาแรงดูดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีที่ทำให้เกิดการลดการสูญเสีย มาวิเคราะห์เป็นสมรรถนะแรงดูด ดังสมการที่ 3.53 เพื่อเปรียบเทียบกันเพื่อหาข้อสรุปในการเลือกกรณีที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันของอากาศน้อยสุดมาเป็นต้นแบบ

#### 4.3 ขอบเขตของการพัฒนา

งานวิจัยนี้ต้องการที่เพิ่มสมรรถนะในการบิดคด โดยลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการอันอากาศที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบ โดยที่จะทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดการอันอากาศดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของใบพัด
2. ระยะห่างจากปลายใบพัดถึงกรอบของอุปกรณ์
3. ความโค้งมนของตัวกรอบอุปกรณ์

ซึ่งแต่ละกรณีศึกษาจะทำการศึกษาตัวแปรที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีอีก 3 กรณี ซึ่งรวมแล้วมีทั้งหมด 9 กรณีศึกษาและหลังจากศึกษากรณีต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสูญเสียแล้ว จะทำการเปรียบเทียบแรงดูดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อเลือกตัวแปร เพื่อหาข้อสรุปในการเลือกตัวแปรที่ส่งผลให้การสูญเสียน้อยที่สุดมาเป็นต้นแบบในการรวมตัวแปรของแต่ละกรณีเพื่อสร้างต้นแบบ ดังรูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพของแนวทางการพัฒนา รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ได้แสดงไว้ในบทที่ 5



รูป 4.1 แสดงแผนผังของแนวทางการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## การจำลองการไหล

### 5.1 บทนำ

การพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนั้นเราสามารถทำการทดลองจริงเพื่อที่จะนำไปสู่ต้นแบบได้ แต่ขั้นตอนการดำเนินการต่างๆ ในการทดลองนั้นต้องใช้ต้นทุนในการสร้างชุดทดลองสูง นอกจากนั้นยังสูญเสียเวลาในการทดลองค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่สามารถนำข้อมูลเก่ามาปรับปรุงได้ ต้องทำการทดลองใหม่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปร่างและขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าว Computational Fluid Dynamic, CFD เป็นกระบวนการวิธีที่พัฒนาจากแนวคิดเกี่ยวกับวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหาในทางวิศวกรรมที่ได้รับคามนิยม ในปัจจุบันได้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทาง CFD หลายโปรแกรมให้เลือกใช้เพื่อความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นบทที่ 5 จึงกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับแบบจำลองการไหลรวมทั้งเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดให้กับแบบจำลองของแต่ละกรณี และวิธีการกำหนดค่าต่างๆ ภายในโปรแกรมเพื่อเป็นฐานความรู้ของผู้ที่เข้ามาศึกษาปริญญาโทรุ่นนี้

### 5.2 แบบจำลองการไหลภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

ในการพัฒนาแบบจำลองการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD<sup>®</sup> [6] ในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลเพียงอย่างเดียว ดังนั้นโปรแกรมจึงแก้สมการเพียงสองสมการ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สำหรับวิธีการจำลองการไหลในปริญญาโทรุ่นนี้ ได้ใช้วิธีกำหนดให้แกนหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนด (Rotating Frame) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กับปัญหาของใบพัด โดยส่วนที่กำหนดให้หมุนนั้นจะมีความเร็วของมวลอากาศเป็นความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity) เทียบกับแกนหมุน เสมือนเราสังเกตอยู่บนแกนที่มีการหมุนอยู่ ส่วนของของไหลที่ไม่ได้กำหนดให้เป็นของไหลที่มีการหมุนนั้นจะมีความเร็วของมวลอากาศที่เสมือนเราสังเกตอยู่บนจุดหยุดนิ่ง ดังนั้นผลของการจำลองการไหลที่แสดงในบทที่ 6 นั้น จะมีการแสดงสนามความเร็วออกมาเป็น 2 ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### 5.2.1 ขอบเขตของปัญหา

ในปริญญาโทรุ่นนี้ได้มีการวางขอบเขตของการจำลองการไหลไว้ 11 กรณี โดยกรณีแรกเป็นการจำลองการไหลภายในอุปกรณ์ต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนาซึ่งเป็นรูปร่างอ้างอิงจาก Patent [1] แต่ได้มีการปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของการทดลอง ส่วนอีก 9 กรณี เป็นการจำลองการไหลเพื่อ



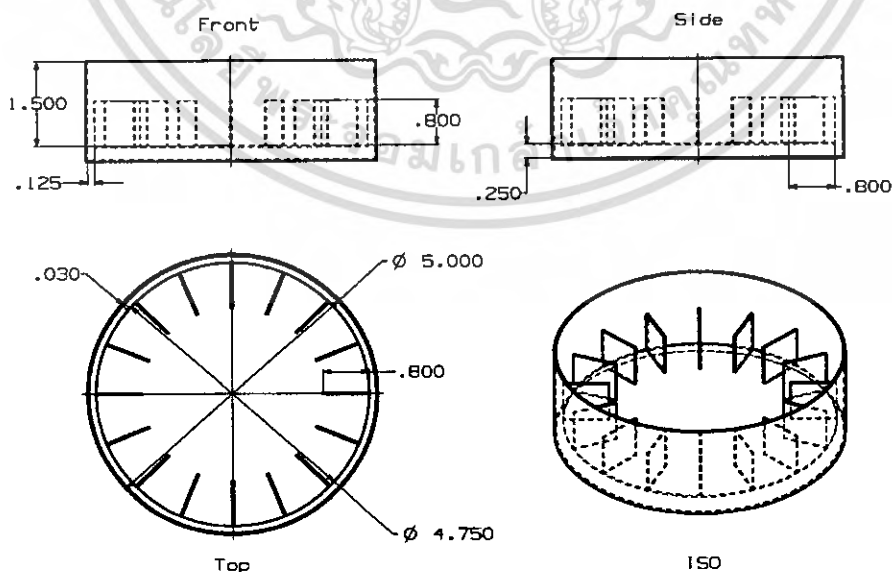
รูป 5.1 แสดงตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอื่นของอากาศ

ศึกษาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดกระแสไหลวนที่ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างจากแนวความคิดเพื่อการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอื่นอากาศ แบ่งเป็น 3 กรณีใหญ่ ได้แก่ รูปร่างของใบ, ระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบอุปกรณ์ และความโค้งมนของกรอบครอบอุปกรณ์ตามลำดับดังแสดงในรูป 5.1 โดยแต่ละตัวแปรจะมีการปรับเปลี่ยนค่าภายในตัวแปรแต่ละตัวแปรอีก 3 ค่า และกรณีสุดท้ายเป็นการจำลองการไหลเพื่อวิเคราะห์ต้นแบบที่ได้จากการดึงเอาผลที่ดีที่สุดของ 3 กรณีหลักข้างต้นมาประกอบเป็นต้นแบบที่จะส่งผลให้มีการลดการสูญเสียน้อยที่สุด ตามแผนผังของแนวทางการพัฒนาและการออกแบบในบทที่ 4 เพื่อความสะดวกในการแยกกรณีต่างๆ ทางผู้เขียนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จึงกำหนดชื่อ และแสดงรายละเอียดของแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

5.2.2 รายละเอียดโครงสร้างอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ใช้ในการจำลองการไหล

5.2.2.1 อุปกรณ์ A อุปกรณ์ต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนา

สำหรับโครงสร้างของในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ในการจำลองการ ไหลนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ใบพัดจะมีจำนวนซี่ใบพัด 16 ซี่ใบพัด และใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.75 นิ้ว ใบพัดมีพื้นที่ 0.8 นิ้ว x 0.8 นิ้ว เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนาของอุปกรณ์วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เท่ากับ 0.03 นิ้วและระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบมีระยะห่างเท่ากับ 0.125 นิ้ว ดังรูป 5.2

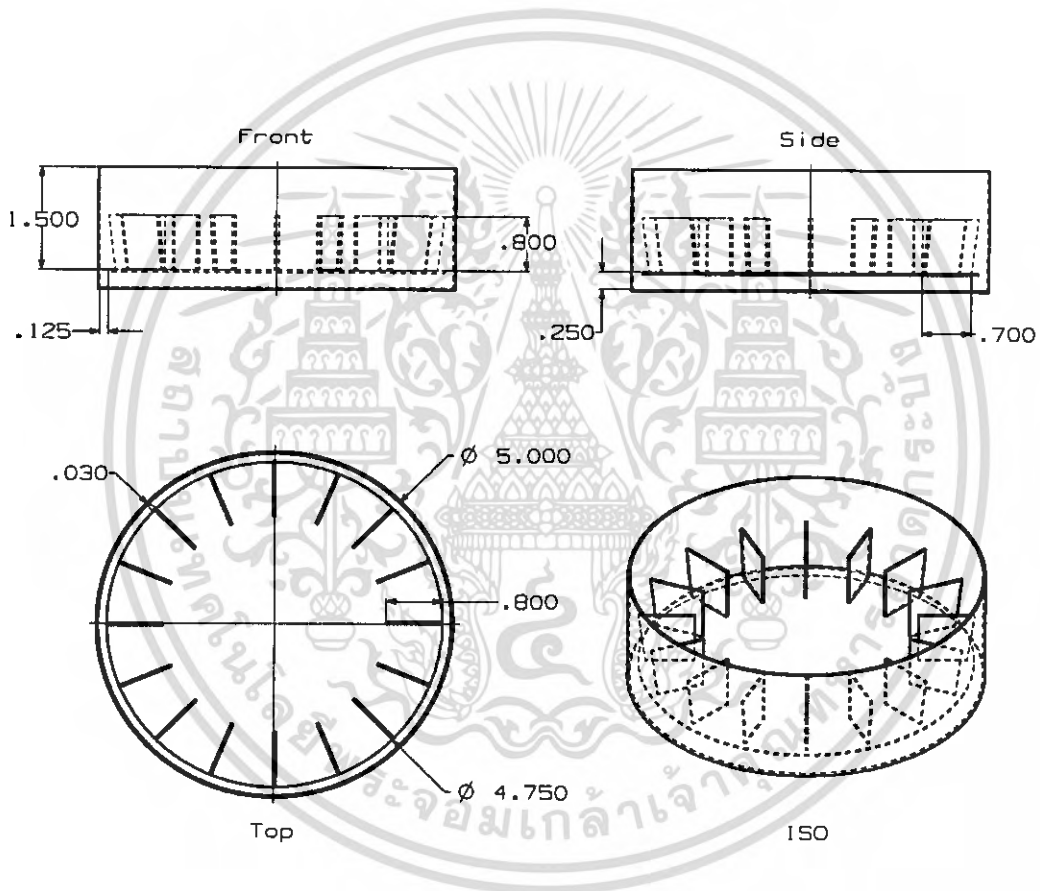


รูป 5.2 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ A

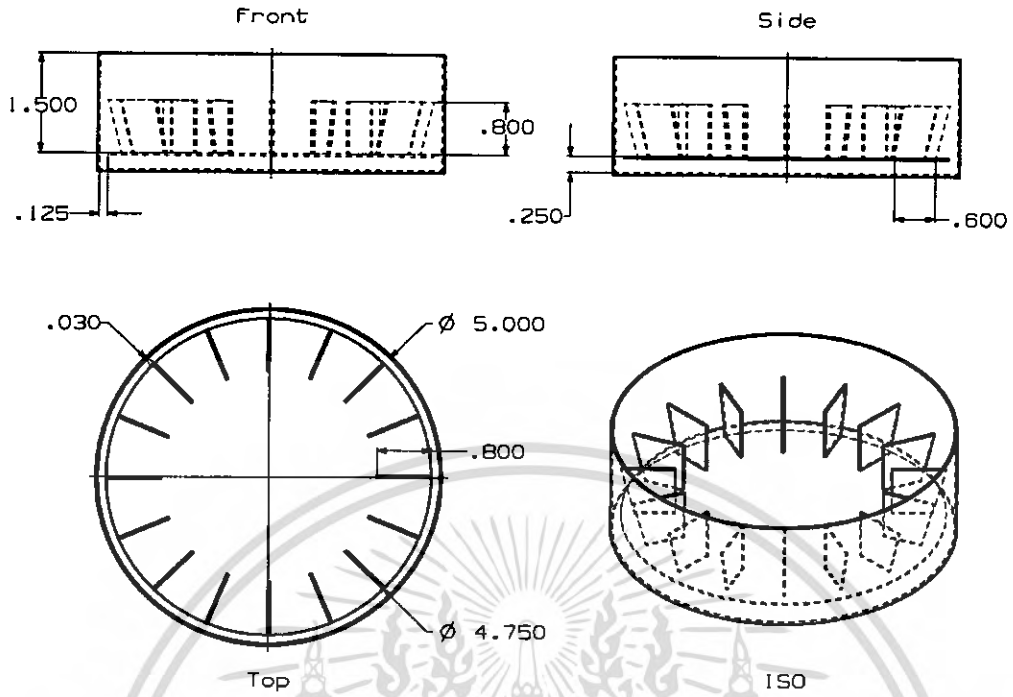
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.2 อุปกรณ์ B1, B2 และ B3 อุปกรณ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใบพัด

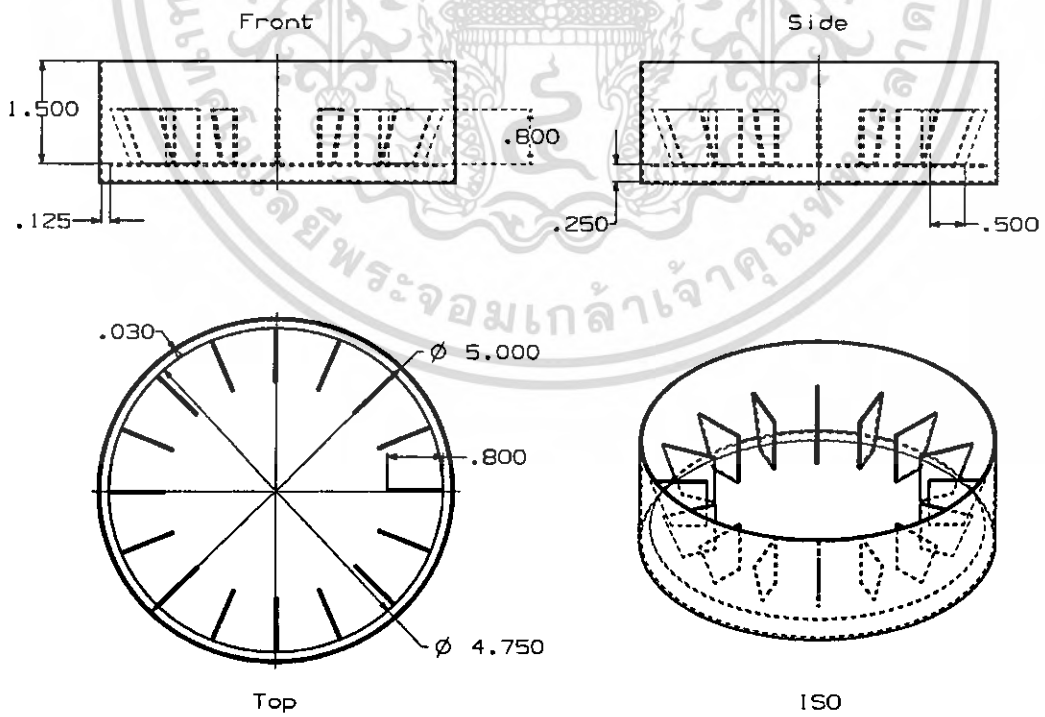
สำหรับโครงสร้างของในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใบพัด เพื่อใช้ในการจำลองการไหลนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ใบพัดจะมีจำนวนซี่ใบพัด 16 ซี่ใบพัด และใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.75 นิ้ว ใบพัดมีความสูง 0.8 นิ้ว ฐานล่างใบพัดมีความยาว 0.7 นิ้ว, 0.6 นิ้ว และ 0.5 นิ้ว ตามลำดับของอุปกรณ์ B1, B2 และ B3 ใบพัดเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ความหนาของอุปกรณ์วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เท่ากับ 0.03 นิ้ว และระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบรอบมีระยะห่างเท่ากับ 0.125 นิ้ว ดังรูป 5.3, 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



รูป 5.3 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B1



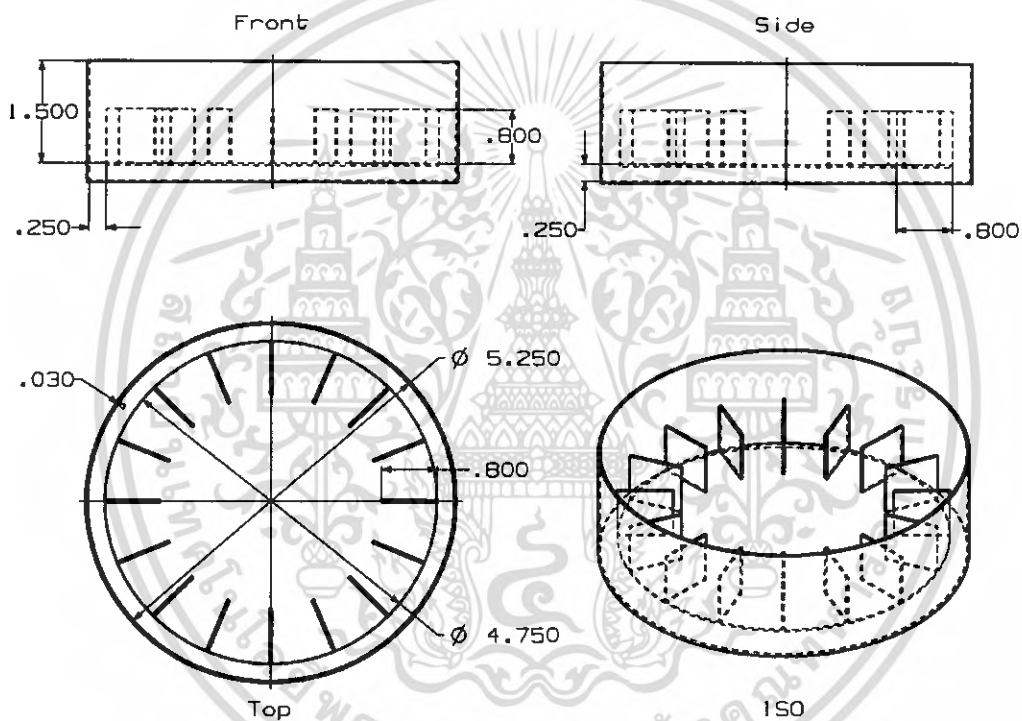
รูป 5.4 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B2



รูป 5.5 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ B3

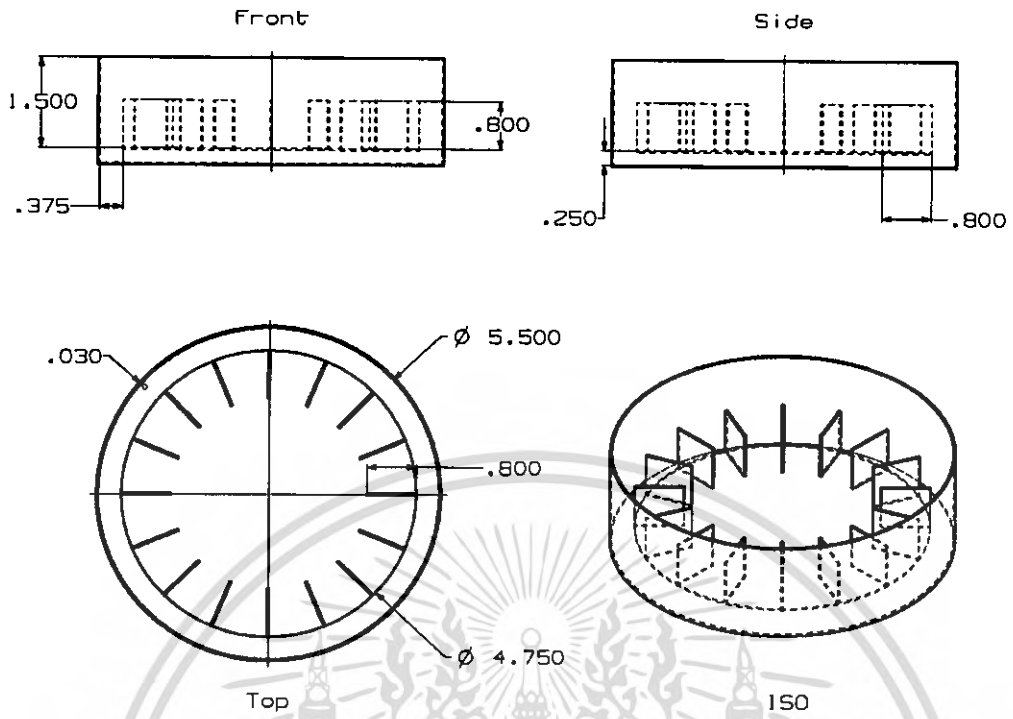
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.3 อุปกรณ์ D1, D2 และ D3 อุปกรณ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบ สำหรับโครงสร้างของในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างกรอบครอบเพื่อใช้ในการจำลองการไหลนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ใบพัดจะมีจำนวนซี่ใบพัด 16 ซี่ใบพัด และใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.75 นิ้ว ใบพัดมีพื้นที่ 0.8 นิ้ว x 0.8 นิ้ว เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนาของอุปกรณ์วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เท่ากับ 0.03 นิ้ว และระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบมีระยะห่างเท่ากับ 0.25 นิ้ว, 0.375 นิ้ว และ 0.5 นิ้ว ตามลำดับอุปกรณ์ D1, D2 และ D3 ดังรูป 5.6, 5.7 และ 5.8

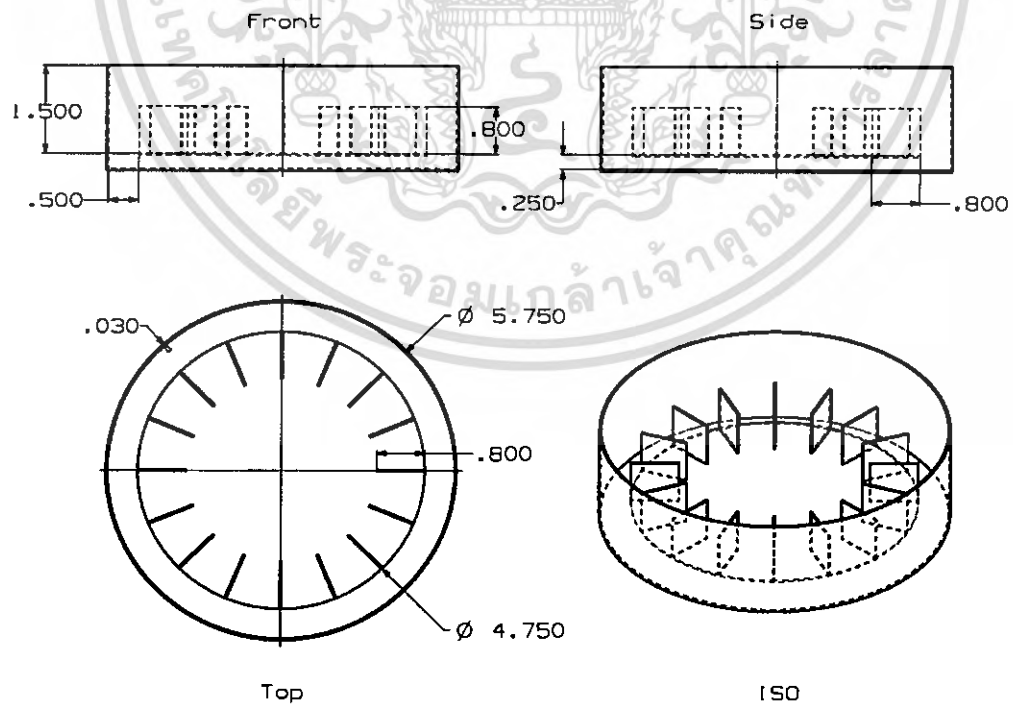


รูป 5.6 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.7 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D2

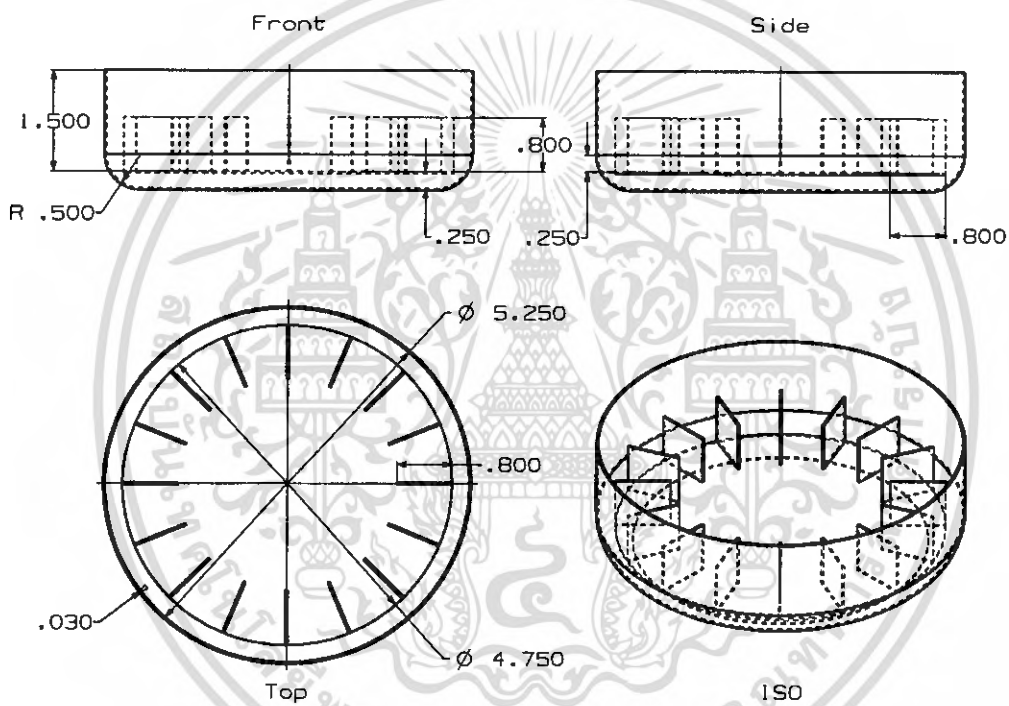


รูป 5.8 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ D3

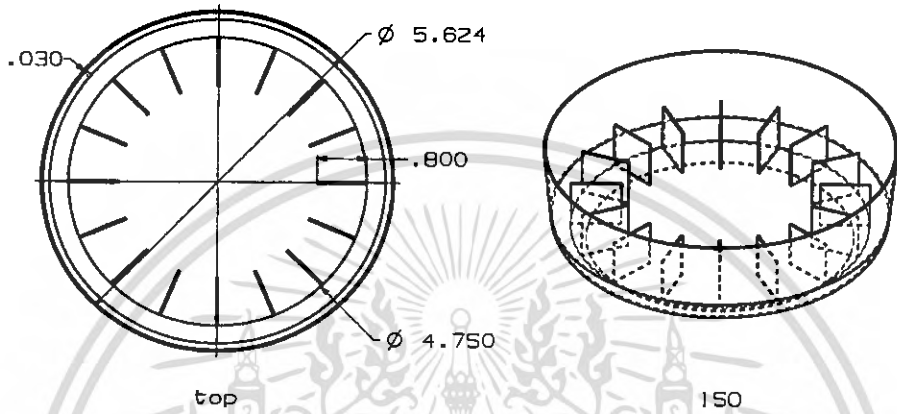
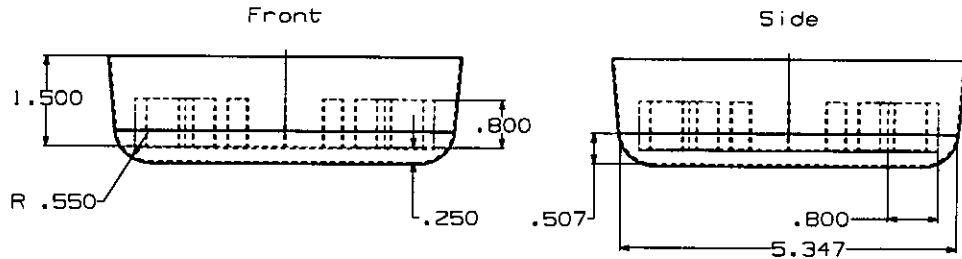
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.2.4 อุกรณ์ C1, C2 และ C3 อุกรณ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งมนของกรอบครอบ

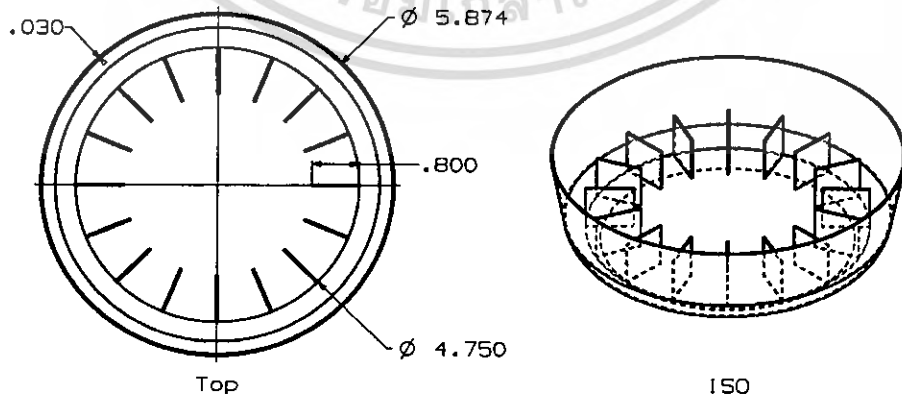
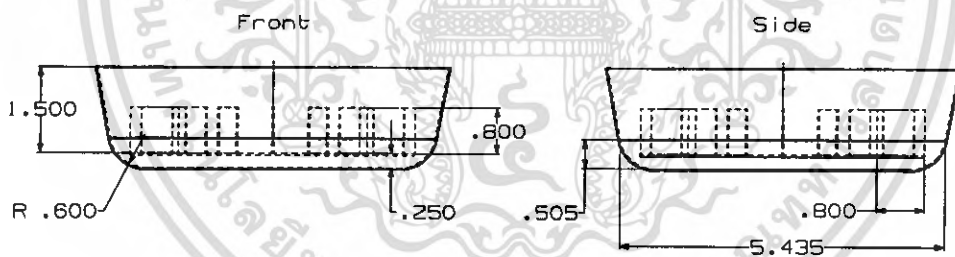
สำหรับ โครงสร้างของในอุกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสนไหลวนที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งมนของกรอบครอบเพื่อใช้ในการจำลองการไหลนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ใบพัดจะมีจำนวนซี่ใบพัด 16 ซี่ใบพัดและใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.75 นิ้ว ใบพัดมีพื้นที่ 0.8 นิ้ว x 0.8 นิ้ว เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนาของอุกรณ์วัสดุที่ใช้ทำอุกรณ์เท่ากับ 0.03 นิ้ว และรัศมีความโค้งมนของกรอบครอบเท่ากับ 0.5 นิ้ว, 0.55 และ 0.60 ตามลำดับอุกรณ์ C1, C2 และ C3 ดังรูป 5.9, 5.10 และ 5.11



รูป 5.9 แสดง โครงสร้างอุกรณ์ C1



รูป 5.10 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ C2



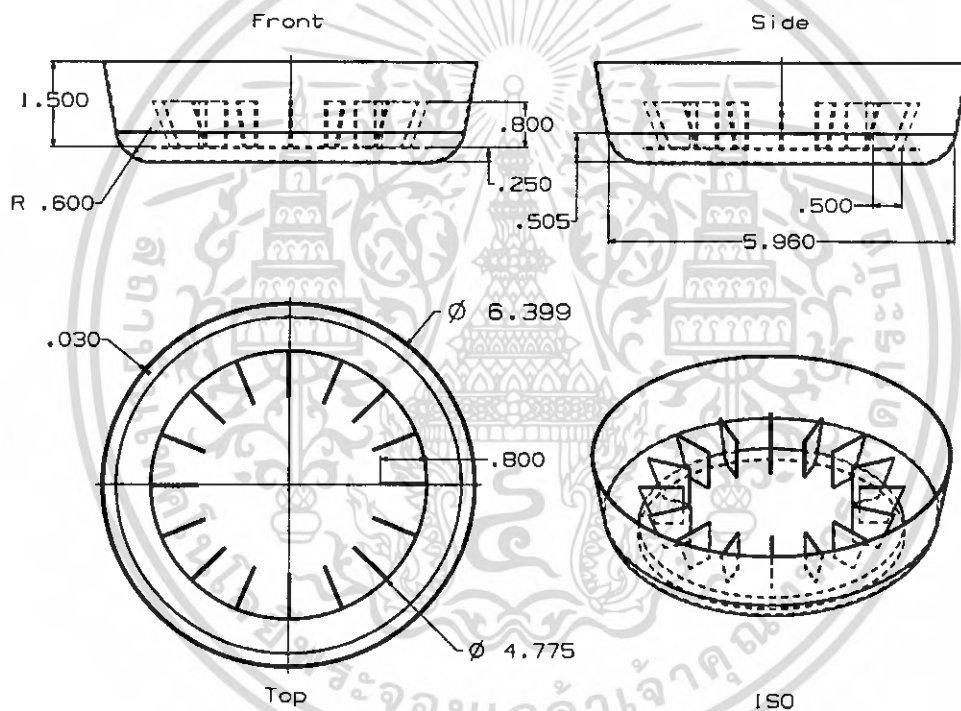
รูป 5.11 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ C3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.5 อุปกรณ์ M อุปกรณ์ต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาโดยนำเอาส่วนดีของแต่ละกรณีใหญ่มารวมกัน

สำหรับโครงสร้างของในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนต้นแบบที่ได้มีพัฒนาเปลี่ยนแปลงรูปร่างใบพัด ระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบ และความโค้งมนของกรอบครอบ เพื่อใช้ในการจำลองการไหลวนที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ใบพัดจะมีจำนวนซี่ใบพัด 16 ซี่ใบพัด และใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.75 นิ้ว ใบพัดมีความสูง 0.8 นิ้ว ฐานล่างใบพัดมีความยาว 0.5 นิ้ว ใบพัดเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ความหนาของอุปกรณ์วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์เท่ากับ 0.03 นิ้ว ระยะห่างระหว่างใบพัดกับกรอบครอบมีระยะห่างเท่ากับ 0.50 นิ้ว และมีรัศมีความโค้งมนของกรอบครอบเท่ากับ 0.6 นิ้ว ดังรูป 5.12

หมายเหตุ: ต้นแบบของอุปกรณ์ M นี้ได้นำเอาส่วนที่ดีที่สุดจากการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ชนิดมารวมกันโดยผลของการจำลองการไหลได้กล่าวไว้ในบทที่ 6



รูป 5.12 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ M

### 5.2.3 เงื่อนไขขอบเขต [6]

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองศึกษาการไหลภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนของปริศณานิพนธ์นี้มีรายละเอียดดังนี้

- เงื่อนไขของใบพัด กำหนดให้เป็น Fluid ที่มีความเร็วรอบที่ 6000 rpm (Rotating Frame)
- เงื่อนไขของกรอบครอบ กำหนดให้เป็น Wall แบบไม่มีการเลื่อนไหล และอยู่นิ่ง
- เงื่อนไขของทางออกด้านบนตัวอุปกรณ์ กำหนดให้เป็น Wall แบบไม่มีการเลื่อนไหล และอยู่นิ่ง
- เงื่อนไขของระบบ กำหนดให้เป็นระบบปิด Mass Flux คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม STAR-CD® [6]

เนื่องจากการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลของอากาศในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนผ่านทางโปรแกรม STAR-CD นั้น มีขั้นตอนในการทำหลายขั้นตอนซึ่งทางผู้จัดทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้สังเกตเห็นถึงความง่ายต่อการเข้าใจถึงวิธีการใช้โปรแกรมของผู้ที่เข้ามาอ่านปริญญานิพนธ์ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้แบ่งเป็น 2 หัวข้อคือตั้งแต่การสร้าง mesh จนไปถึงการกำหนดค่าต่างๆ ในการจำลองและการเรียกผลลัพธ์ พฤติกรรมการไหล ทางผู้เขียนได้แสดงภาพประกอบคำอธิบายไว้เพื่อความสะดวกต่อการอ่าน

#### 5.3.1 สร้าง Mesh ด้วย MSC.visualNastran 2002 [12]

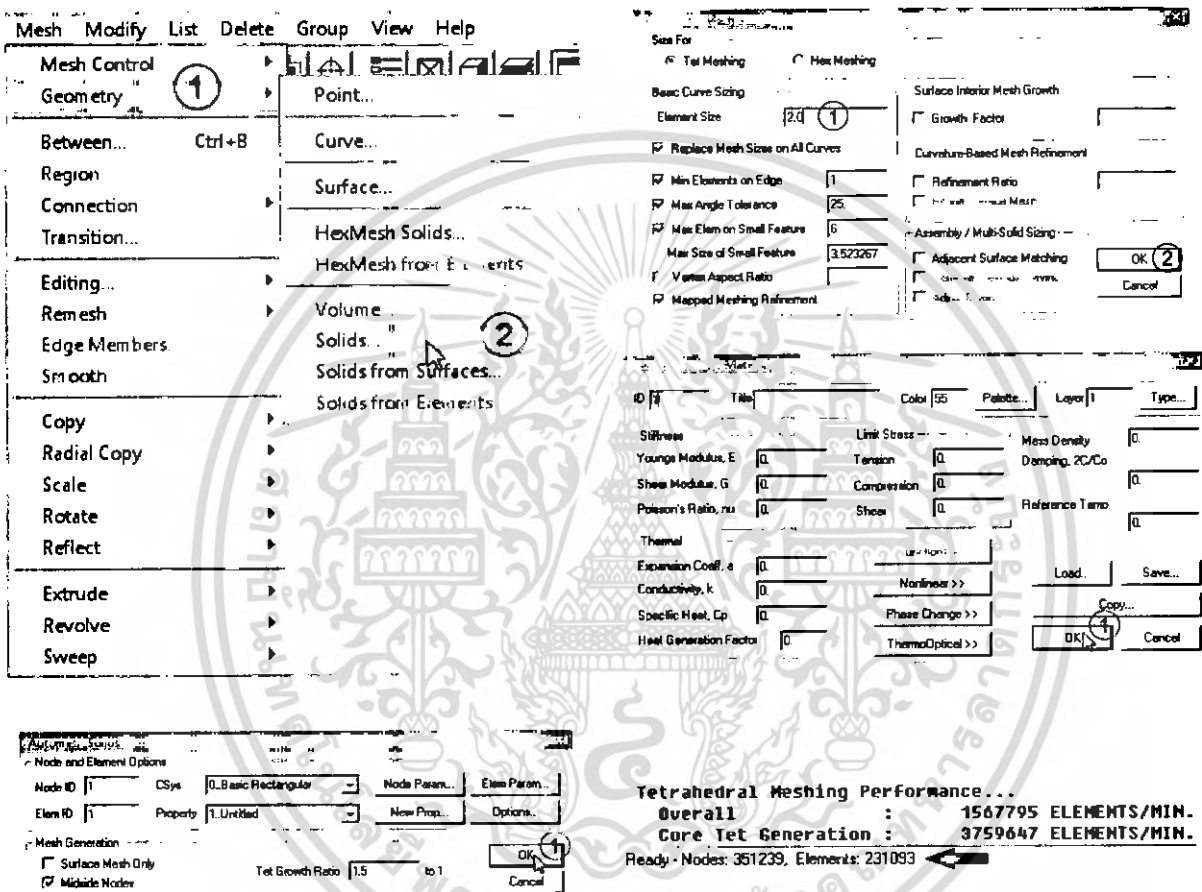
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอขั้นตอนการสร้าง Mesh โดยผ่านทางโปรแกรมที่มีชื่อว่า MSC.visualNastran 2002 มีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้



รูป 5.13 แสดงขั้นตอนการเข้าโปรแกรมและนำเข้าไฟล์ชิ้นงานที่เป็น Palasolid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปิดโปรแกรม MSC.visualNastran 2002 ขึ้นมา → New Model
- File → Import → Geometry
- เลือกไฟล์ .x\_t (palasolid) ที่ได้จากออกแบบ
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Geometry Scale Factor เป็น 1000
- คลิกเลือก OK

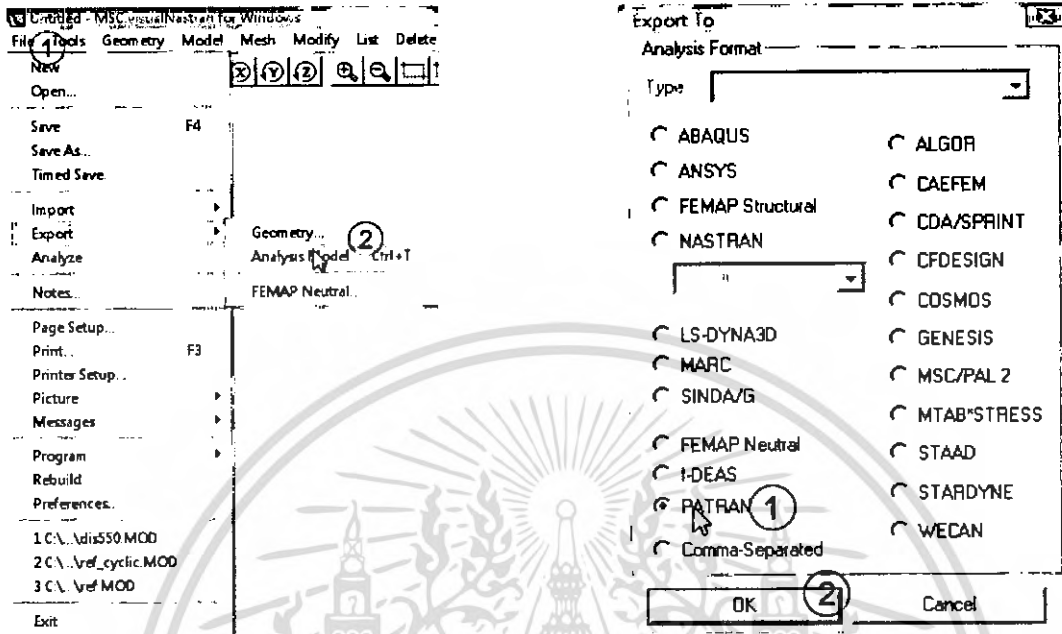


รูป 5.14 แสดงขั้นตอนการสร้าง Mesh

- ที่แถบเมนูด้านบนเลือก mesh → Geometry → Solids
- จากนั้นจะมีหน้าต่าง Automatic Mesh Sizing ปรากฏขึ้นมาให้เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Element size เป็น 2.0 → OK
- จากนั้นหน้าต่าง Define Automatic Material ปรากฏขึ้นมาให้คลิกเลือก OK
- จากนั้นหน้าต่าง Automesh Solids จะปรากฏขึ้นมาให้คลิกเลือก OK
- เมื่อโปรแกรมทำการสร้าง mesh สำเร็จแล้วจะปรากฏข้อความว่า Ready - Nodes: 351239, Elements: 231093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ: จำนวน Elements ยิ่งมากยิ่งมีความละเอียดของ mesh มาก ซึ่งควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานที่จะจำลอง โดยทางปริญาณานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้จำนวน mesh อยู่ที่ประมาณ 200,000



รูป 5.15 แสดงขั้นตอนการส่งออกไฟล์ชิ้นงานเป็น Patran

- หลังจากทำการสร้าง mesh สำเร็จ ต่อไปจะเป็นขั้นตอนการ Export
- File → Export → Analysis Model
- เมื่อหน้าต่าง Export to ปรากฏขึ้นมาให้เลือก Patran → OK

### 5.3.2 การจำลองเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของความดันและสนามความเร็ว

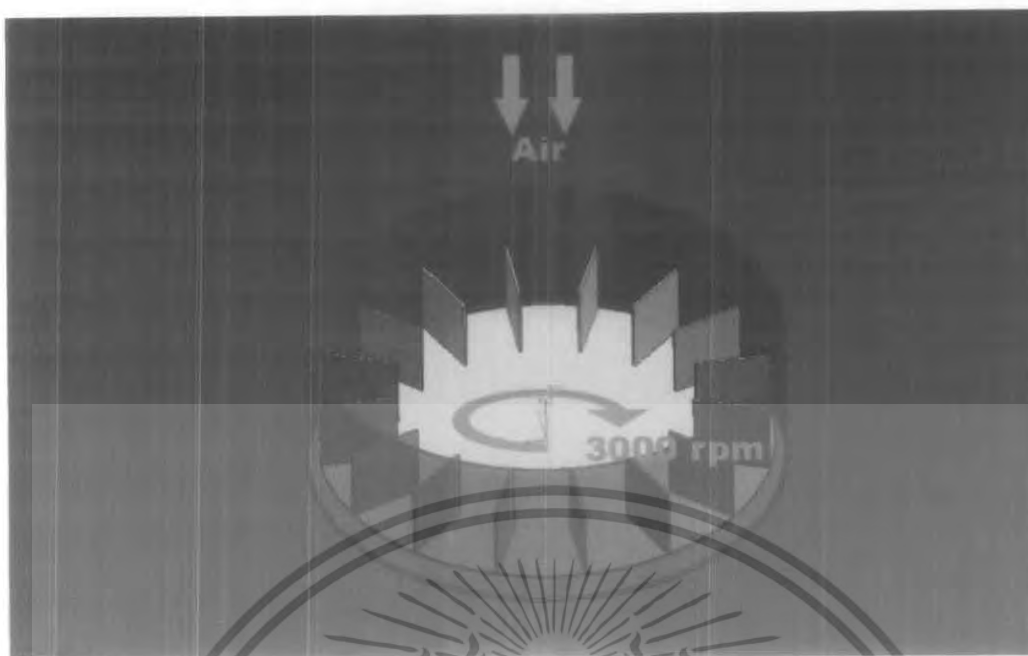
หัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนการจำลองการไหลของอากาศภายในตัวอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวน (Vortex Attractor) ดังรูป 5.17 ตัวอุปกรณ์ประกอบด้วย ใบพัดขนาด 0.8" x 0.8" จำนวน 16 ใบ, กำแพงครอบแหวน (Containing Ring) และจานหมุน (Backplate)

ของไหลในที่นี้คืออากาศ จะถูกใบพัดซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบที่ 6000 rpm ผลักดันให้เกิดการหมุนวนขึ้นภายในอุปกรณ์ โดยใช้เทคนิค Rotating Frame และคุณสมบัติของอากาศเป็นดังต่อไปนี้

$$\text{Density} = 1.205 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Molecular viscosity} = 1.81 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{ms}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

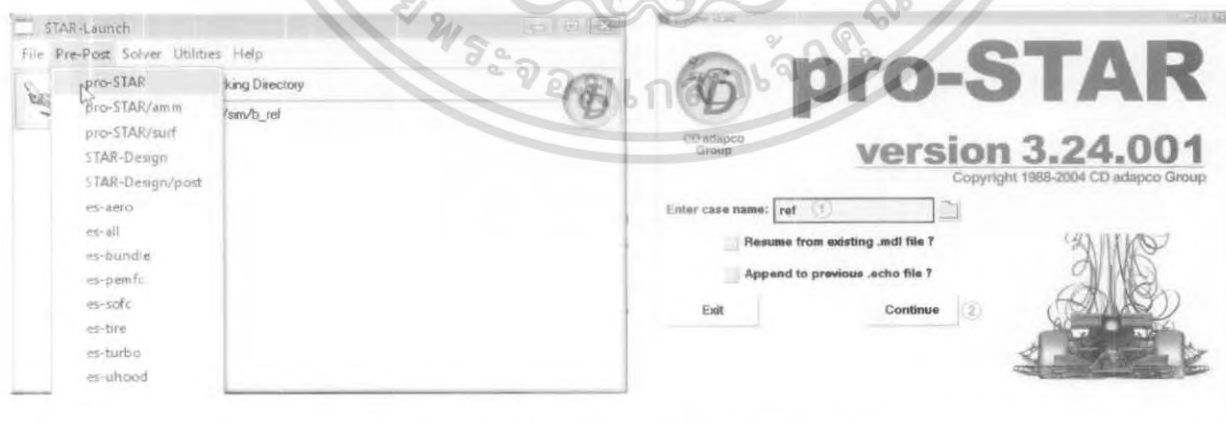


รูป 5.16 แสดงรายละเอียดปัญหาของการจำลองการไหล

#### 5.3.2.1 กำหนดค่าคุณสมบัติให้กับชิ้นงาน

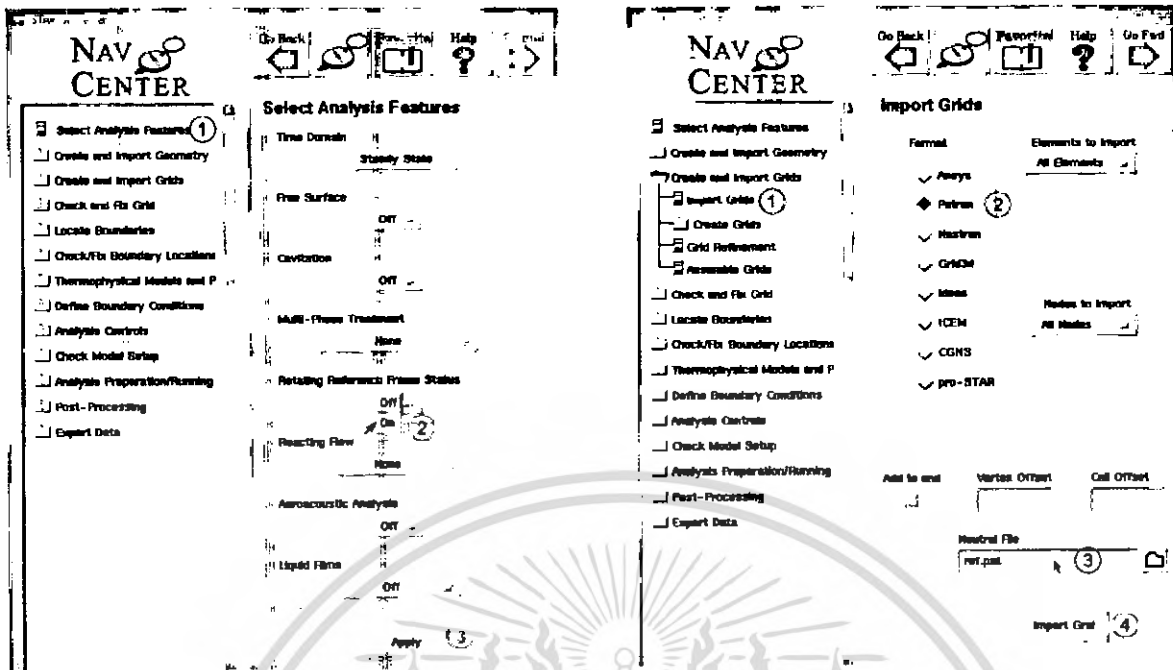
เนื่องจากเราทำการสร้าง Mesh ด้วยโปรแกรม MSC.visualNastran 2002 เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดค่าต่างๆ ในโหมด prostar ที่อยู่ใน STAR-CD (6)

- ที่หน้าต่าง STAR-Launch → Pre-Post → pro-STAR
- พิมพ์ ref ลงในช่อง Enter Case Name text Box
- คลิกเลือก Continue



รูป 5.17 แสดงขั้นตอนการเข้าโหมด pro-STAR

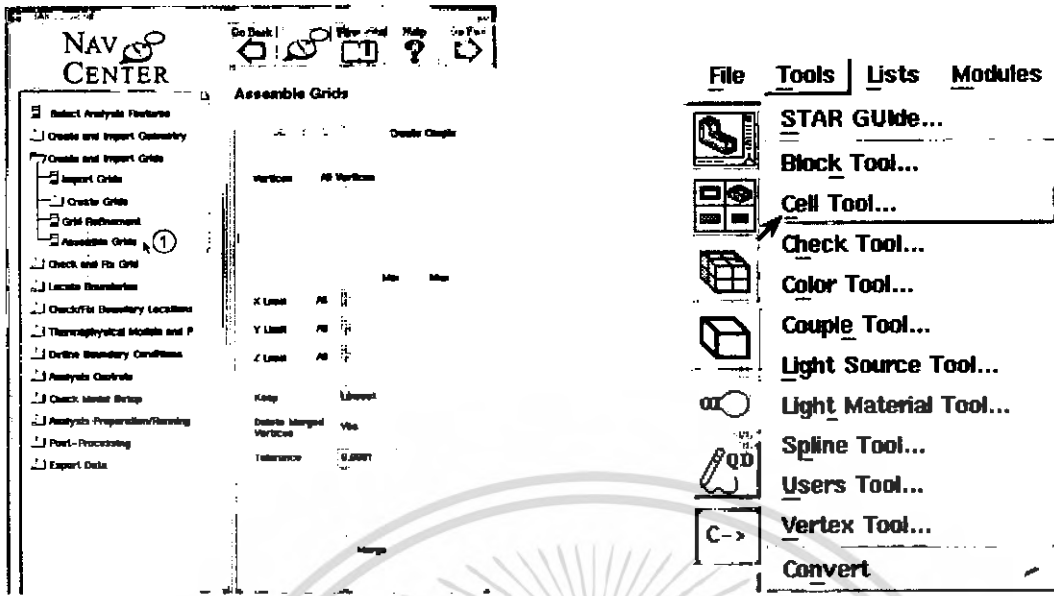
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.18 แสดงขั้นตอนการกำหนด Rotating Frame และ การนำเข้าไฟล์ชิ้นงาน Patran

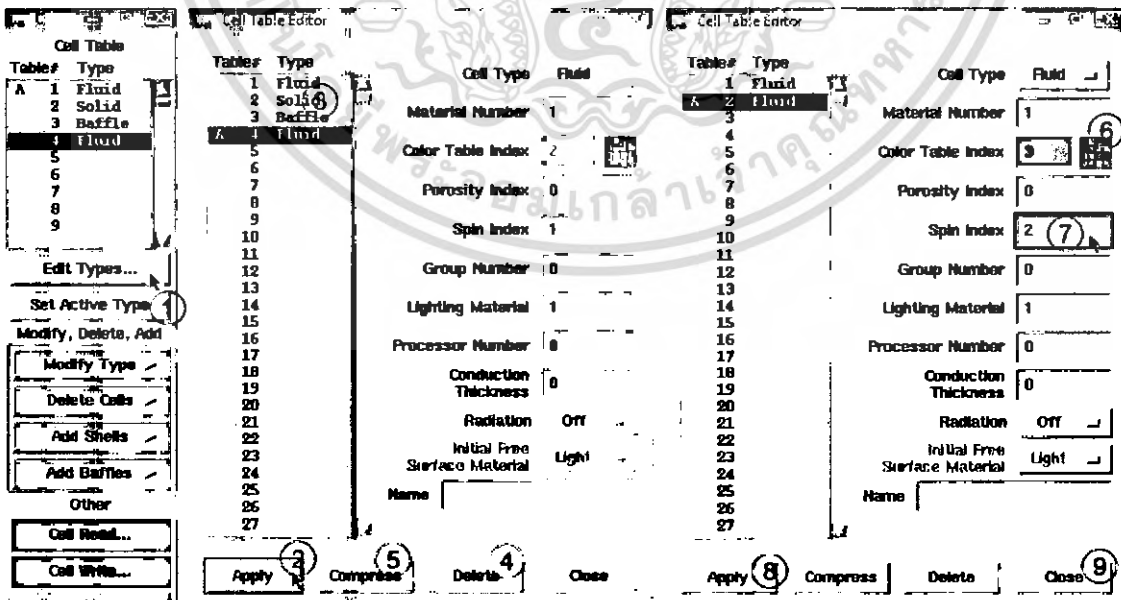
- ที่หน้าต่าง Star Guide คลิกเลือกที่หัวข้อ Select Analysis Feature
- ที่ Rotating Reference Frame Status ทำการเปลี่ยน เป็น On → Apply ดังรูป 5.17
- ที่หน้า Output ให้พิมพ์คำสั่ง CSYS 2 → Enter
- ที่หน้าต่าง Star Guide คลิกเลือกที่หัวข้อ Create and Import Grids → Import Grids
- ที่ Format ให้เลือก Patran → เลือกไฟล์ที่เราทำการ Export จาก MSC.visualNastran 2002
- คลิกเลือก Import Grid ดังรูป 5.17
- ที่หัวข้อ Create and Import Grids → Assemble Grids → Merge ดังรูป 5.18
- ที่หน้าต่าง pro-STAR บนแถบเครื่องมือด้านบนให้เลือก Plot → Up Axis → Z
- ที่หน้าต่าง pro-STAR บนแถบเครื่องมือด้านซ้ายให้เลือก C → All
- คลิกเลือก Cell Plot
- ที่หน้าต่าง pro-STAR บนแถบเครื่องมือด้านบนให้เลือก Tools → Cell Tool ดังรูป 5.18
- จะมีหน้าต่าง Cell ปรากฏขึ้นมา ให้คลิกเลือก Edit Type
- จะมีหน้าต่าง Cell Table Editor ขึ้นมาให้คลิกเลือก Fluid ตัวที่ 4 → Apply
- จากนั้นทำการ Delete Fluid, Solid และ Baffle ที่อยู่เหนือ Fluid ตัวที่ 4 ออก
- คลิกเลือก Fluid ตัวที่ 4 → Compress
- ทำการสร้าง Fluid ตัวที่ 2 ขึ้นมาโดยกำหนดให้เป็นสี เขียวอ่อน และที่ Spin Index ให้เปลี่ยนเป็นเลข 2 → Apply → Close ดังรูป 5.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



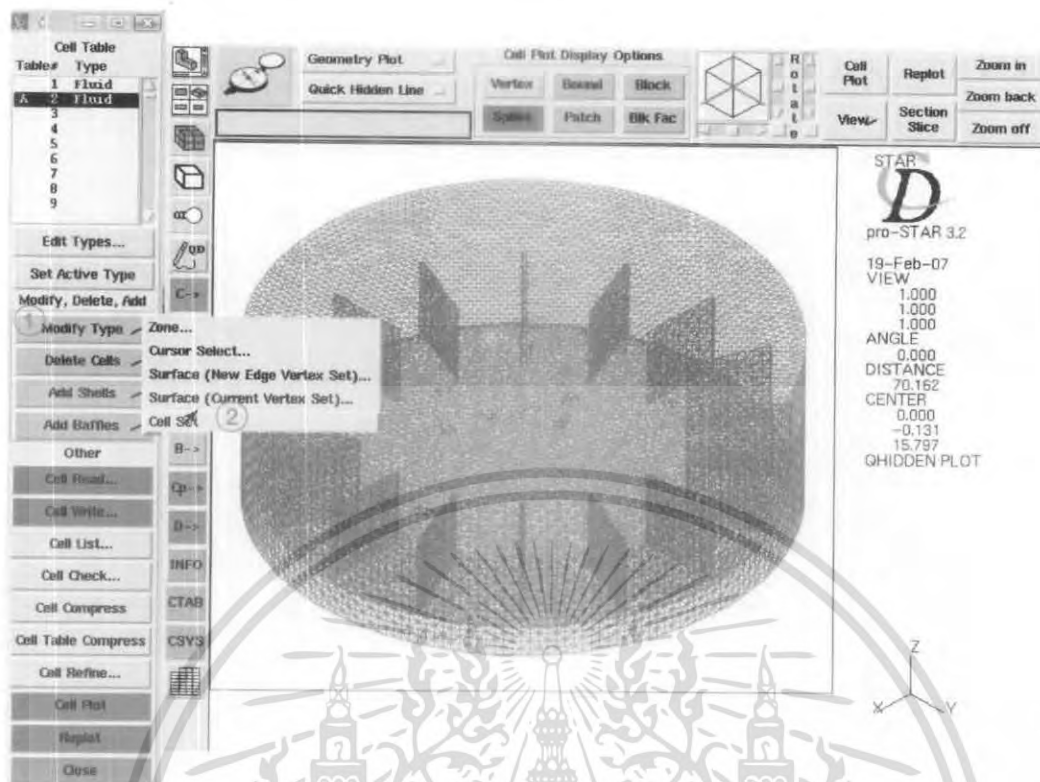
รูป 5.19 แสดงขั้นตอนการ Merge ไฟล์ชิ้นงาน และการเข้าสู่หน้าต่าง Cell Tool

- ที่หน้าต่าง pro-STAR บนแถบเครื่องมือด้านซ้ายให้เลือก C → New → Zone
- ทำการครอบให้โดนใบพัดทั้งหมด → Done
- ที่หน้าต่าง Cell → คลิกเลือก Modify Type → Cell Set ดังรูป 5.20
- ที่หน้าต่าง pro-STAR บนแถบเครื่องมือด้านซ้ายให้เลือก C → All
- คลิกเลือก Cell Plot



รูป 5.20 แสดงขั้นตอนการกำหนดของไหลส่วนที่มีใบพัดให้เป็นการไหลที่มีการหมุน ในหน้าต่าง Cell Tool

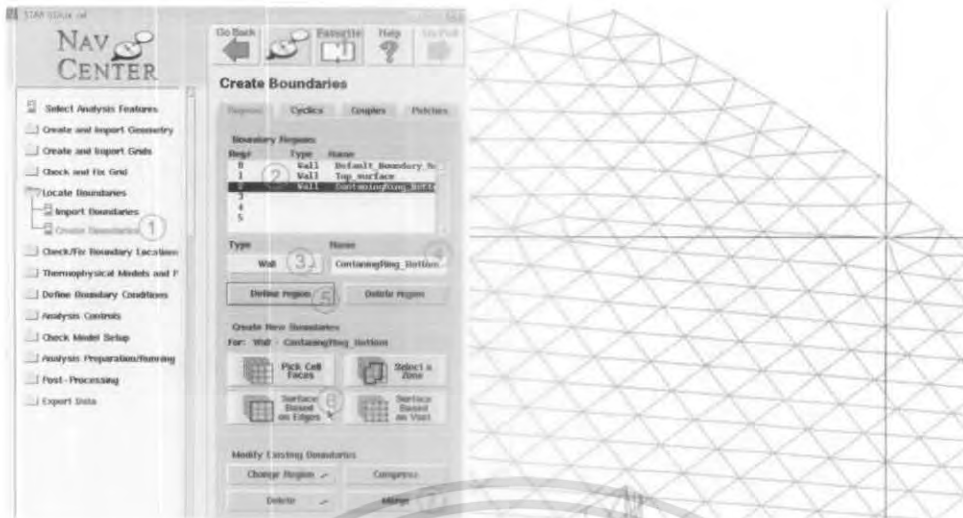
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.21 แสดงขั้นตอนการเลือกส่วนของโหลที่มีใบพัดอยู่เป็นของโหลประเภทที่ 2 (ของโหลที่มีการหมุน)

- คลิกเลือกที่หัวข้อ Locate Boundaries ที่อยู่ในหน้าต่าง Star Guide
- เลือกหัวข้อ Create Boundaries
- ทำการสร้าง Boundaries Region ขึ้นมาใหม่ 2 Region
- เลือก Type เป็น Wall และพิมพ์ชื่อ "Top Surface" ลงในช่อง Name
- คลิกเลือก Define Region
- คลิกเลือก Surface Based on Edges
- คลิกเลือก ส่วนผิวบน
- คลิกเลือก Merge แล้ว Plot all ดู
- เลือก Type เป็น Wall และพิมพ์ชื่อ "ContainingRing\_Bottom" ลงในช่อง Name
- คลิกเลือก Define Region
- คลิกเลือก Surface Based on Edges
- คลิกเลือก ส่วนผิวข้างและผิวด้านล่างทั้งหมด
- คลิกเลือก Merge แล้ว Plot all ดังรูป 5.21

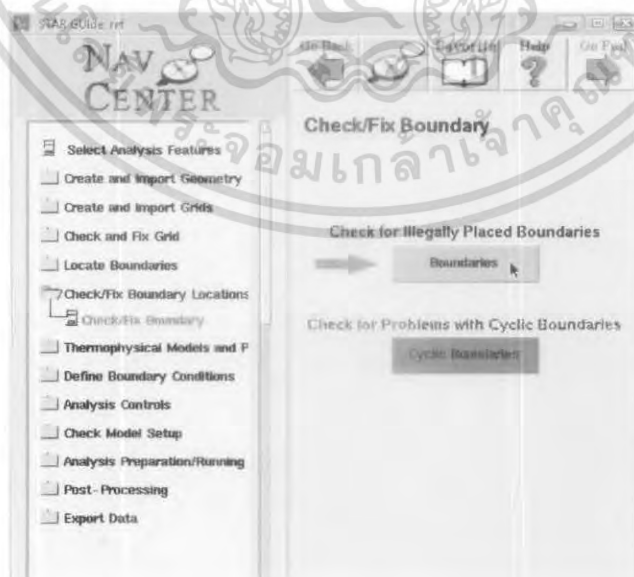
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.22 แสดงขั้นตอนการกำหนด Boundary Location

- คลิกเลือกหัวข้อ Check/Fix Boundary Locations ในหน้าต่าง Star Guide
- คลิกเลือกหัวข้อ Check/Fix Boundary
- คลิกเลือก Check for Illegally Placed Boundaries
- โปรแกรมจะทำการตรวจสอบหาข้อผิดพลาด
- คลิกเลือก Plot All Boundaries

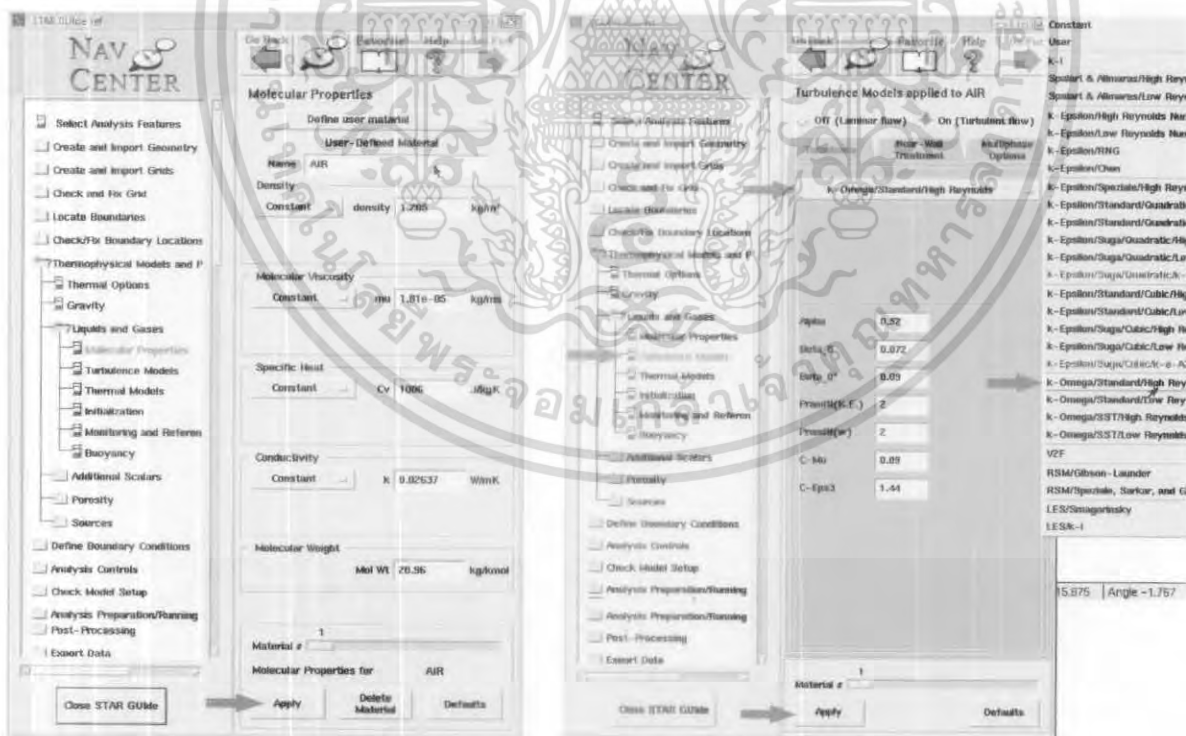
หมายเหตุ : ถ้าไม่มีข้อผิดพลาด ทางโปรแกรมจะแสดงข้อความ "ALL BOUNDARIES CHECKED SUCCESSFULLY"



รูป 5.23 แสดงขั้นตอนการตรวจสอบ Boundary Location

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่หน้าต่าง Star Guide คลิกเลือก Rotating Reference Frames
- ที่ Reference Frame Treatment คลิกเลือกเป็น Implicit
- ที่ช่อง Spin parameter → Spin Index 2 → Omega -6000 → Co-ord. sys 2
- คลิกเลือก Thermophysical and Properties ในหน้าต่าง Star Guide
- คลิกเลือกหัวข้อ Liquids and Gases
- คลิกเลือกหัวข้อ Molecular properties
- โดยค่า Default ที่ให้มาเป็นของอากาศอยู่แล้ว ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ค่า Default ได้เลย คลิกเลือก Apply
- คลิกเลือกหัวข้อ Turbulence Models
- คลิกเลือก K-Omega/Standard/High Reynolds → Apply
- คลิกเลือกหัวข้อ Installization
- เปลี่ยนเลขตรง Coordinate system จาก 1 เป็น 2 → Apply
- คลิกเลือกหัวข้อ Monitoring and reference data
- คลิกเลือก Cell ใหม่ที่ตรง Monitoring Cell number (ใช้ Reference Pressure Cell number โดยกดที่ตรงเครื่องหมาย → Apply ดังรูป 5.23



รูป 5.24 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คลิกเลือกหัวข้อ Define Boundary Condition
- คลิกเลือกหัวข้อ Define Boundary Regions
- ที่ Regions 0 หรือ "Default\_Boundary\_Regions" ให้เปลี่ยนตัวเลขที่ช่อง Coordinates เป็น 2
- ที่ Regions 1 หรือ "Top\_Surface" ให้เปลี่ยนตัวเลขที่ช่อง Coordinates เป็น 2
- ที่ Regions 2 หรือ "ContainingRing\_Bottom" ให้เปลี่ยนตัวเลขที่ช่อง Coordinates เป็น 2
- คลิก Apply ดังรูป 5.24



รูป 5.25 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Boundary Condition

- คลิกเลือกหัวข้อ Analysis Control
- คลิกเลือกหัวข้อ Solution Control → Solution Method
- กำหนดค่าของตัวเลือกต่างๆ ดังนี้
  - Steady State
  - Solution Algorithm เป็น PISO
  - ที่เหลือปล่อยให้เป็นค่า Default ไป → Apply
- คลิกเลือกหัวข้อ Equation Behavior → Primary Variables → Solver Parameters
- ให้เปลี่ยนตัวเลขในช่องแรกของ Pressure เป็น 0.1 → Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

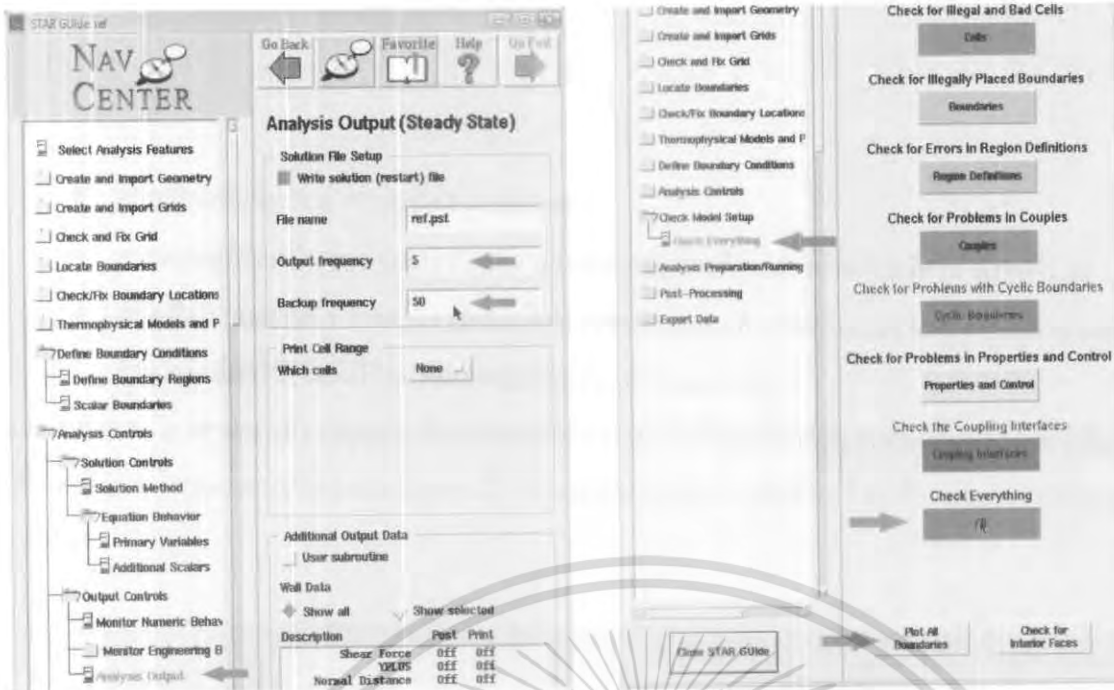
- คลิกเลือกหัวข้อ Equation Behavior → Primary Variables → Differencing Schemes
- ในแถบ Item ให้เปลี่ยนเป็น MARS ดังรูป 5.25
- คลิกเลือกหัวข้อ Output Control → Analysis Output
- ให้เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Output frequency เป็น 5
- ให้เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Backup frequency เป็น 50 → Apply ดังรูป 5.26

หมายเหตุ : ที่ให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าในหัวข้อ Backup frequency เพื่อทำการให้เก็บข้อมูลสำรองไว้เพื่อข้อมูลเสียหายอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นตัวเลขใดก็ได้ตามความเหมาะสมของผู้ใช้



รูป 5.26 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Analysis Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.27 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Analysis Output และการตรวจสอบชิ้นงาน

- คลิกเลือกหัวข้อ Check Model Setup
- คลิกเลือกหัวข้อ Check Everything
- คลิกเลือก All ที่หัวข้อ Check Everything ดังรูป 5.26
- เมื่อโปรแกรมทำการตรวจสอบเรียบร้อยแล้วให้คลิก Plot All Boundaries เพื่อดูข้อผิดพลาด
- คลิกเลือกหัวข้อ Analysis Preparation/Running
- คลิกเลือกหัวข้อ Set Run Time Controls
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Number of Iterations เป็น 20000
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Max Residual Tolerance เป็น  $1 \times 10^{-4}$
- คลิกเลือก Apply ดังรูป 5.27
- คลิกเลือกหัวข้อ Analysis (Re)start
- ปลดล็อคค่าทุกอย่างเป็นค่า Default หมด → Apply ดังรูป 5.27
- ที่หน้าต่าง pro-STAR ให้เลือก File → Save Model
- ที่หน้าต่าง pro-STAR ให้เลือก File → Write Geometry File
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Geometry Scale Factor เป็น 0.001 → Apply → Close ดังรูป 5.28
- ที่หน้าต่าง pro-STAR ให้เลือก File → Write Problem File → Apply → Close ดังรูป 5.28
- ที่หน้าต่าง pro-STAR ให้เลือก File → Save Model เพื่อทำการเก็บข้อมูลอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

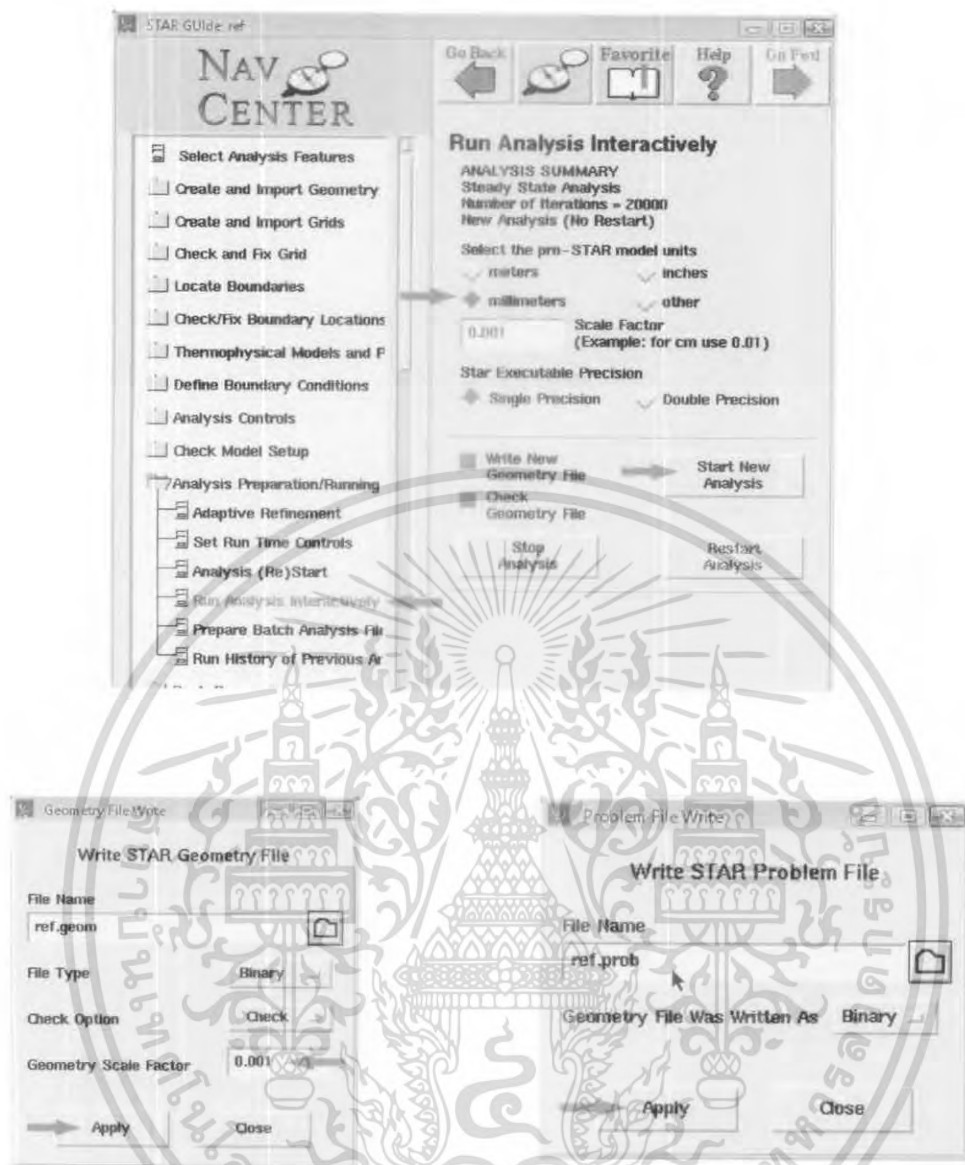
- คลิกเลือกหัวข้อ Run Analysis Interactively
- ตรวจสอบตัวเลขในช่อง Scale Factor ว่าเป็น 0.001 หรือ millimeters หรือ ไม่ ดังรูป 5.28
- คลิกเลือก Start New Analysis จากนั้น โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ จนกว่าจะมีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ (ในที่นี้คือค่าของ Max Residual Tolerance)

หมายเหตุ : เราสามารถที่จะหยุดการคำนวณของ โปรแกรมไว้แล้วมาสั่งให้มันคำนวณใหม่ได้โดย ให้คลิกเลือกหัวข้อ Analysis (Re)start เปลี่ยนจาก None เป็น Standard Restart แล้วเลือกไฟล์ข้อมูลของเราที่มีนามสกุลเป็น .pst → Apply



รูป 5.28 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Set Run Time Controls และ Analysis (re)Start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.29 แสดงขั้นตอนการกำหนดหัวข้อ Run Analysis และ การเขียนไฟล์ Geometry กับ Problem

- คลิกเลือกหัวข้อ Post-Processing
- คลิกเลือกหัวข้อ Load Data
- คลิกเลือก File(s) → เลือกไฟล์ของเรา ในที่นี้คือ ref.pst → Open Post File
- คลิกเลือกค่าที่อยากดู ในที่นี้คือ Total Pressure → Get Data → Go To → Create Plot
- คลิกเลือก Selection Clipped → Option → Contour (Filled)
- เปลี่ยนตัวเลขที่ช่อง Point ให้เป็นดังนี้ ช่อง 0,0,38 ตามลำดับช่อง x,y,z
- เปลี่ยนตัวเลขที่ช่อง Normal ให้เป็นดังนี้ 0,0,1 ตามลำดับช่อง x,y,z ดังรูป 5.29
- คลิกเลือก Apply → Plot to Screen ดังรูป 5.30

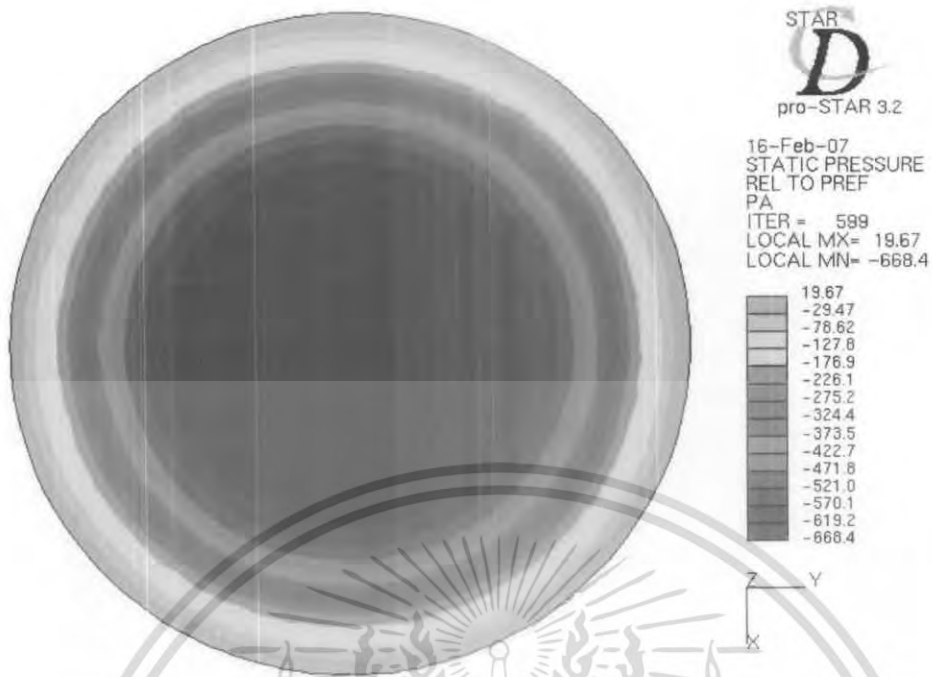
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : เราสามารถดูค่าของ Pressure ได้หลายตำแหน่งตามที่ต้องการ ในที่นี้เราต้องการดูความแตกต่างของความดันเป็นหน้าตัด X-Y แล้วปรับเปลี่ยนค่าของความสูงในแนวแกน Z เพื่อนำค่าไปหาแรงดูด



รูป 5.30 แสดงขั้นตอนการแสดงผลพีซของการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

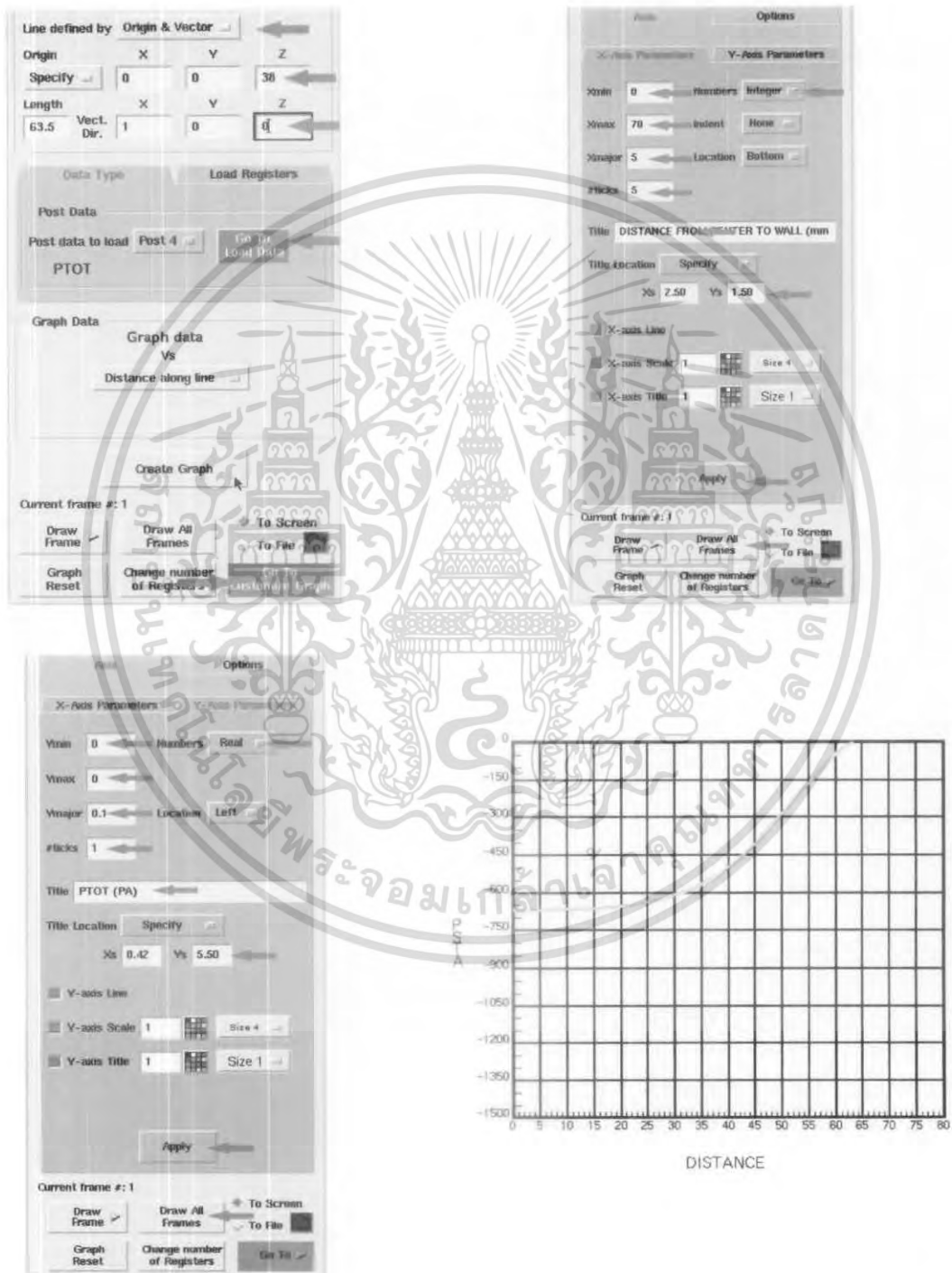


รูป 5.31 แสดงผลลัพธ์ของความแตกต่างของความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์

- คลิกเลือกหัวข้อ Post-Processing
- คลิกเลือกหัวข้อ Graph → Extract/Graph Data → Field Data
- คลิกเปลี่ยน Post 1 เป็น 4 ในช่อง Post Data to Load → Go to Load Data
- คลิกเลือก Total Pressure → Get Data → Go To → Field Data
- ที่หน้าต่าง Pro-STAR ให้เปลี่ยนมุมมองให้เป็นแบบ Geometry Plot และ Quick Hidden Line ตามลำดับ
- กลับมาที่ Star Guide → ที่ช่อง Line Defined By ให้เปลี่ยนเป็น Origin & Vector
- ที่ช่อง Origin ให้เปลี่ยนเป็น Specify → ใส่ตัวเลขดังนี้ 0,0,38 ในช่อง x,y,z
- ที่ช่อง Length ให้เปลี่ยนเป็น 70
- ที่ช่อง Vect. Dir. ใส่ตัวเลขดังนี้ 1,0,0 ในช่อง x,y,z
- คลิกที่ไอคอน Go to Customize Graph → ให้เลือกที่หน้า Axis → X-Axis Parameters
- เปลี่ยนตัวเลขในช่องไล่ลงมาดังนี้ 0,70,5,5
- ที่ช่อง Number ให้เปลี่ยนจาก Real เป็น Integer
- ที่ช่อง Title ให้เปลี่ยนชื่อเป็น "Distance From Center to Wall (mm)"
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Xs เป็น 2.50 และ Ys เป็น 1.50 → Apply
- เลือกที่หน้า Axis → Y-Axis Parameters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปลี่ยนตัวเลขในช่องไล่ลงมาดังนี้ 0,0,0.1,1
- ที่ช่อง Title ให้เปลี่ยนชื่อเป็น "PTOT (PA)"
- เปลี่ยนตัวเลขในช่อง Xs เป็น 0.42 และ Ys เป็น 5.50 → Apply
- คลิก Draw All Frames ดังรูป 5.31



รูป 5.32 แสดงขั้นตอนการแสดงผลกราฟของการจำลองเป็นกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6

## ผลการจำลองการไหล

### 6.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงผลของการจำลองการไหลของอากาศภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนแต่ละชนิด สำหรับผลการจำลองนี้ได้แสดงในรูปของการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ที่ได้มีการพัฒนาในด้านของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันอากาศบริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบ กับอุปกรณ์ต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนา ดังที่ได้กล่าวในรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดไว้ในบทที่ 5 โดยจะแสดงพฤติกรรมของการไหล สนามความเร็ว สนามความดัน กราฟเปรียบเทียบความดันตกคร่อม และตารางเปรียบเทียบสมรรถนะแรงดูด ภายในตัวอุปกรณ์แต่ละชนิด

ในการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างอุปกรณ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกับอุปกรณ์ต้นแบบนั้นมีการเปรียบเทียบใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การเปรียบเทียบเชิงพฤติกรรม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบปรากฏการณ์ของของไหลที่สังเกตได้จากการจำลอง และการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าของความแตกต่างของความดันหรือความดันตกคร่อม แรงดูดอากาศ และสมรรถนะในการดูดของอุปกรณ์แต่ละชนิด โดยมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ ว่าอุปกรณ์ที่ได้มีการออกแบบไว้หรือคาดว่าจะมีผลต่อการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอันอากาศนั้นเป็นไปได้ในทิศทางเช่นใด

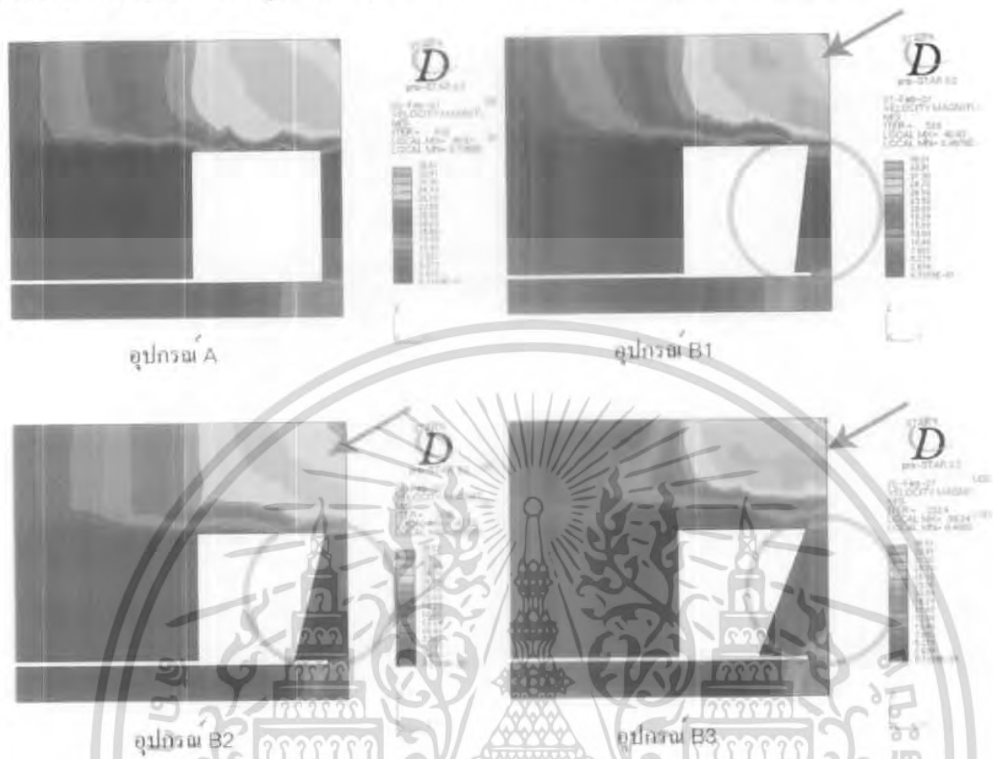
ในการวิเคราะห์ถึงแรงดูดที่เกิดขึ้น ณ บริเวณระนาบบนสุดของอุปกรณ์ที่ยึดติดกับผนังหรือเพดานของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของส่วนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ต้นแบบที่ยังไม่ได้มีการพัฒนาว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรนั้น จะใช้ค่าของสมรรถนะแรงดูด เป็นตัวชี้วัดเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.53 ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

$$\text{สมรรถนะแรงดูด} = \frac{F_{\text{adhesive}}}{W} = \frac{\int_0^r \Delta p 2\pi r dr}{W} \quad (3.53)$$

ในการจำลองการไหลในปริภูมิพิกัดนี้ทั้ง 11 กรณีนี้ ผลที่ได้จากการจำลองการไหลนั้น ได้ใช้เทคนิคการกำหนดให้แกน หมุนด้วยความเร็วเท่ากับ  $\Omega r$  (Rotating Frame) โดยวิธีการกำหนดค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 ดังนั้นผลของความเร็วจากการจำลองที่ออกมานั้นจะมี 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ณ บริเวณตั้งแต่ฐานใบพัดขึ้นไปจนถึงบนสุดของใบพัด จะมีความเร็วเป็นความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity) ที่มีค่าต่ำ อันเนื่องมาจากเสมือนเราเห็นสังเกตความเร็วอยู่บนแกนที่กำลังหมุนอยู่ หรือมีความเร็วที่เทียบเท่ากับ  $\Omega r$  ส่วนที่ 2 บริเวณที่เหลือจะมีผลของความเร็วเป็นแบบแกนหยุดนิ่ง (Fixed Frame) หรือเสมือนเรากำลังสังเกตความเร็วอยู่บนจุดที่หยุดนิ่ง ความเร็วตรงส่วนนี้จะมีค่าสูง

## 6.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปรกรณ์ A กับ อุปรกรณ์ B1, B2 และ B3

### 6.2.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปรกรณ์ A, B1, B2 และ B3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว



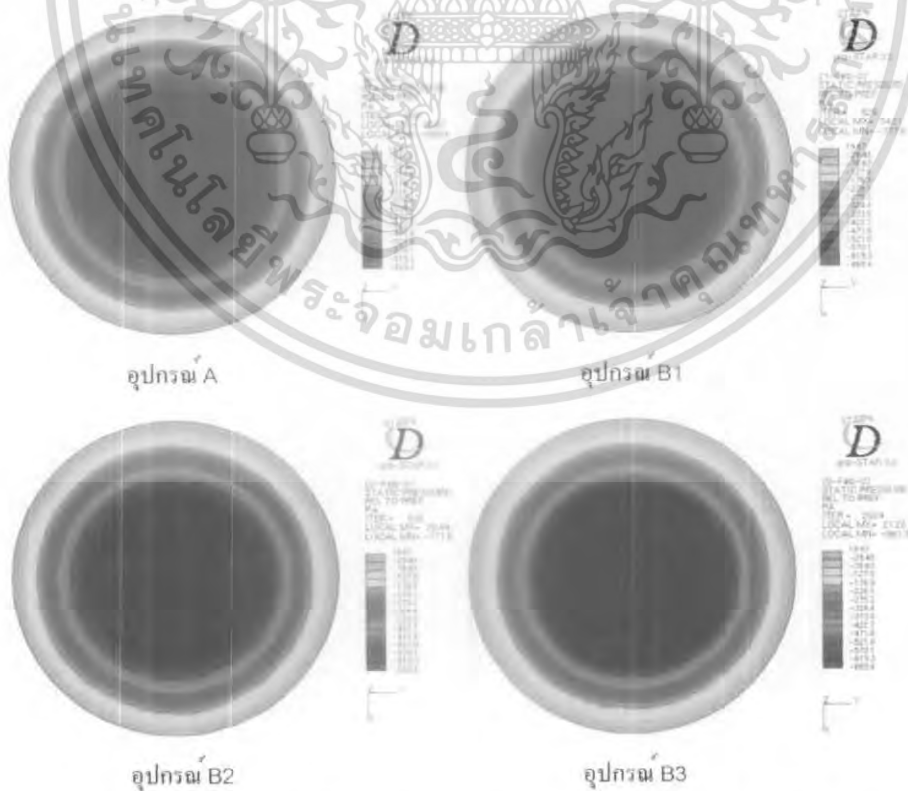
รูป 6.1 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วในของอุปรกรณ์ A, B1, B2 และ B3

จากรูป 6.1 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของสนามความเร็วตามแนวแกน Y และ Z ของการไหลวนของอากาศที่มีการเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ภายในอุปรกรณ์สร้างแรงดูดชนิด A, B1, B2, และ B3 ตามลำดับ โดยหลักการทำงานของอุปรกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนจะเริ่มจากมวลอากาศจะถูกดูดให้วิ่งลงมาตรงกลางของอุปรกรณ์ จากนั้น มวลอากาศจะถูกใบพัดขับเคลื่อนด้วยแรงบิดที่ได้รับมาจากมอเตอร์ จึงเกิดการไหลวนขึ้นระหว่างใบพัดกับมวลอากาศ โดยโมเมนตัมของมวลอากาศที่เพิ่มขึ้นจะ ส่งผลให้ความเร็วของมวลอากาศเพิ่มขึ้นตาม แต่เมื่อมวลอากาศเดินทางออกจากใบพัดมาชนกับกรอบครอบ ตรงส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดการสูญเสียของความเร็วมวลอากาศซึ่งจะสังเกตได้จากรูป 6.1 สำหรับส่วนที่ 1 ณ บริเวณ ฐานใบพัดจนถึงบนสุดของใบพัดความเร็วในส่วนนี้จะเป็นความเร็วที่เราสังเกตจากจุดบนแกนที่หมุนอยู่ด้วยความเร็วเท่ากับ  $\omega r$  ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ จากสี่ของเวกเตอร์ความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบของอุปรกรณ์ชนิด A ที่มีสีเป็นสีม่วงและน้ำเงินเข้มหรือมีความเร็วสุทธิต่ออยู่ในย่าน  $0.07389 - 2.676$  m/s แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของใบพัดโดยที่ทำให้มีการเว้าดังอุปรกรณ์ B1, B2 และ B3 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นถึงช่องว่างที่มากขึ้น ส่งผลให้ทิศทางการไหลของอากาศมีการเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น ลดการชนอย่างทันทีกับกรอบครอบเมื่อออกจากใบพัดเนื่องจากมีพื้นที่เพิ่มขึ้น และความเร็วโดยรวมของมวลอากาศ ณ บริเวณปลายใบถึงกรอบครอบ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุปรกรณ์ B1 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีน้ำเงินเข้มถึงฟ้าเข้มหรือมีความเร็วของอากาศอยู่ในย่าน  $0.07389 - 7.682$  m/s ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ B2 มีสีของความเร็วยังตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบเป็นสีน้ำเงินเข้มถึงสีครามหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน 2.676 - 7.682 m/s และอุปกรณ์ B3 อยู่ในอุปกรณ์ มีสีของความเร็วยังตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบเป็นสีม่วงถึงสีครามหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน 2.676 - 10.48 m/s โดยรวมแล้วความเร็ว ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบของอุปกรณ์ B3 มีค่ามากที่สุดจากสีของความเร็วยังที่มีค่ามากมีพื้นที่มากที่สุด

สำหรับส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ความเร็วเป็นแบบแกนหยุดนิ่ง (Fixed Frame) หรือเสมือนเรากำลังสังเกต ความเร็วอยู่บนจุดที่หยุดนิ่ง จากผลการจำลองความเร็ว ณ บริเวณเหนือใบพัด โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า อุปกรณ์ B3 นั้นมีสีของความเร็วยังที่มีค่ามาก สีเข้มถึงสีเข้มเข้มไปตรงตรงบริเวณขอบของอุปกรณ์ และความเร็วมีค่าต่ำมีบริเวณกว้างมากกว่าอุปกรณ์ A, B1 และ B2 ที่มีความเร็วค่าของมวลอากาศที่ค่อนข้างกระจายเป็นวงกว้างไม่ได้คงอยู่ ณ บริเวณขอบเหมือนอุปกรณ์ B3 จากปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายเชื่อมโยงไปถึงความแตกต่างของความดันได้จากสมการ 3.51 ในบทที่ 3 ความเร็วของมวลอากาศที่มีค่ามากบริเวณขอบและความเร็วที่มีค่าต่ำบริเวณตรงกลางหรืออาจกล่าวได้ว่ายังมีความแตกต่างของความเร็วมากเท่าไรยิ่งส่งผลให้ความแตกต่างของความดันมีค่ามากเท่านั้น ทั้งหมดนี้ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่ารูปร่างของใบพัดของอุปกรณ์ B3 มีความเร็วโดยรวม ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบมากที่สุด และมีความแตกต่างของความเร็วโดยรวม ณ บริเวณเหนือใบพัดมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความดันมากที่สุด ปรากฏการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ B3 มีการสูญเสียของความเร็วยัง ณ บริเวณนั้นน้อยสุดจากอุปกรณ์ ทั้ง 4 ชนิด

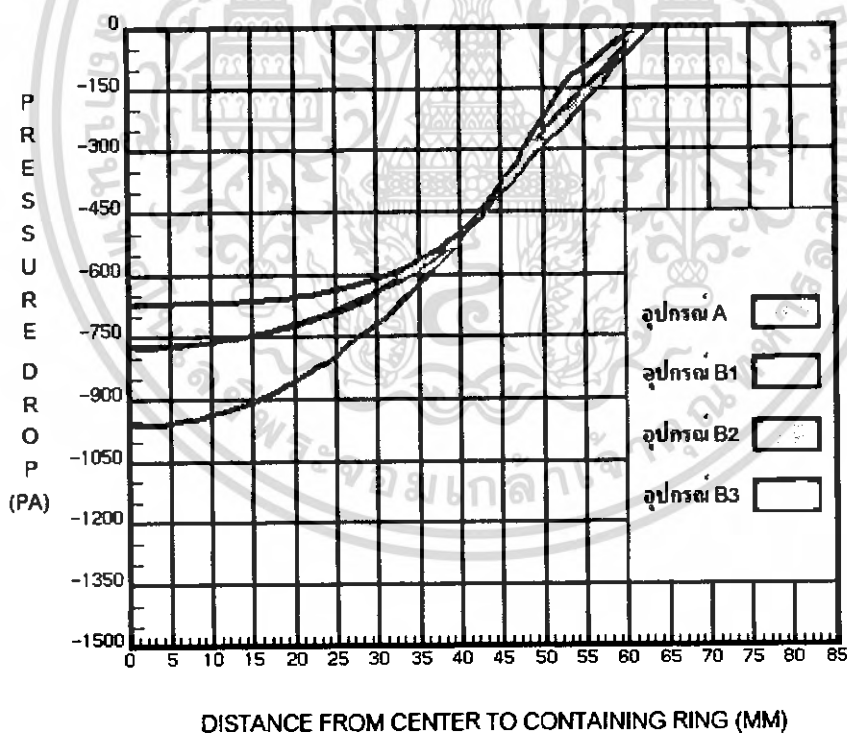
#### 6.2.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดันของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3



รูป 6.2 แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความดันที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนั้น จากการจำลองจะเห็นได้ถึงความแตกต่างของความดันเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศหรือเรียกว่าความดันตกคร่อม โดยสังเกตได้จากรูป 6.2 ค่าของความดันตกคร่อมตรงกลางจะมีค่ามากและมีค่าลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าของความดันตกคร่อมระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 4 จะสังเกตเห็นได้ถึงย่านสีที่แตกต่างกัน จากสีของความดันตกคร่อมของแต่ละอุปกรณ์ สีม่วงหรือสีที่มีค่าของความดันตกคร่อมตั้งแต่ -668.4 หรือมีค่ามากกว่าของอุปกรณ์ B3 จะมีความใหญ่ที่สุด โดยมี B2, B1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ โดยค่าของความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ B1 จะมีค่ามากที่สุดและมีค่าเท่ากับ -961.3 ปาสคาล ส่วนอุปกรณ์ B1, B2 และ A จะมีค่าความดันตกคร่อมที่มากที่สุดของแต่ละอุปกรณ์เท่ากับ -777.6, -771.8 และ -668.4 ปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 6.2.1 ที่แสดงพฤติกรรมของสนามความเร็ว สามารถดูรายละเอียดของความดันตกคร่อมได้ที่รูป 6.3 ที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3 โดยจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่เหนือเส้นกราฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นยังมีค่ามากจะยิ่งส่งผลให้มีแรงดูดมากตามไปด้วย และจากกราฟพื้นที่ของอุปกรณ์ B3 มีค่ามากที่สุด โดยมีพื้นที่ของ B2, B1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ

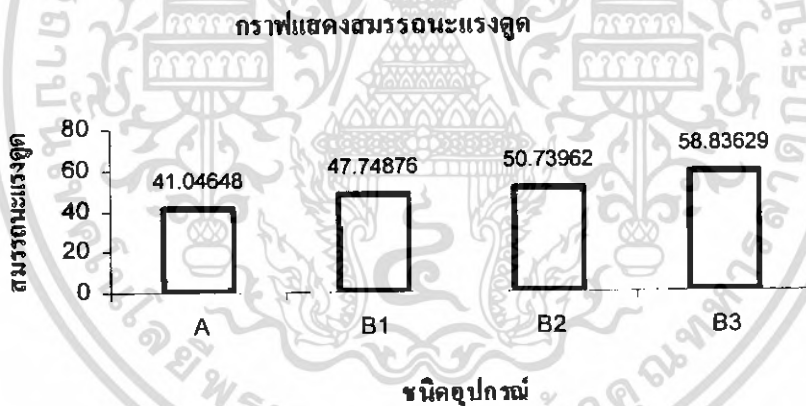


รูป 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

สำหรับรูป 6.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้อธิบายวิเคราะห์หาสมรรถนะของแรงคูดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3 สร้างขึ้นได้ โดยนำค่าของความดันเฉลี่ยต่อพื้นที่เฉลี่ยของอิลเมนต์ที่ได้จากโปรแกรม STAR-CD® [6] เพื่อมาแทนลงในสมการที่ 3.53 โดยอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3 มีรายละเอียดของความดันตกคร่อม น้ำหนัก แรงคูดและสมรรถนะแรงคูดดังต่อไปนี้

ตาราง 6.1 แสดงค่าสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

อุปกรณ์	ความดันตก คร่อมเฉลี่ย	แรงคูด (N)	น้ำหนัก (Kg)	สมรรถนะ แรงคูด	ผลต่างสมรรถนะ แรงคูด	เปอร์เซ็นต์เพิ่ม
A	325.94	4.126813	0.10054	41.04648	0.00000	-
B1	375.85	4.758736	0.09966	47.74876	6.70228	16.3285
B2	395.99	5.013734	0.09881	50.73962	9.69314	23.6150
B3	455.23	5.763788	0.09796	58.83629	17.78981	43.3406



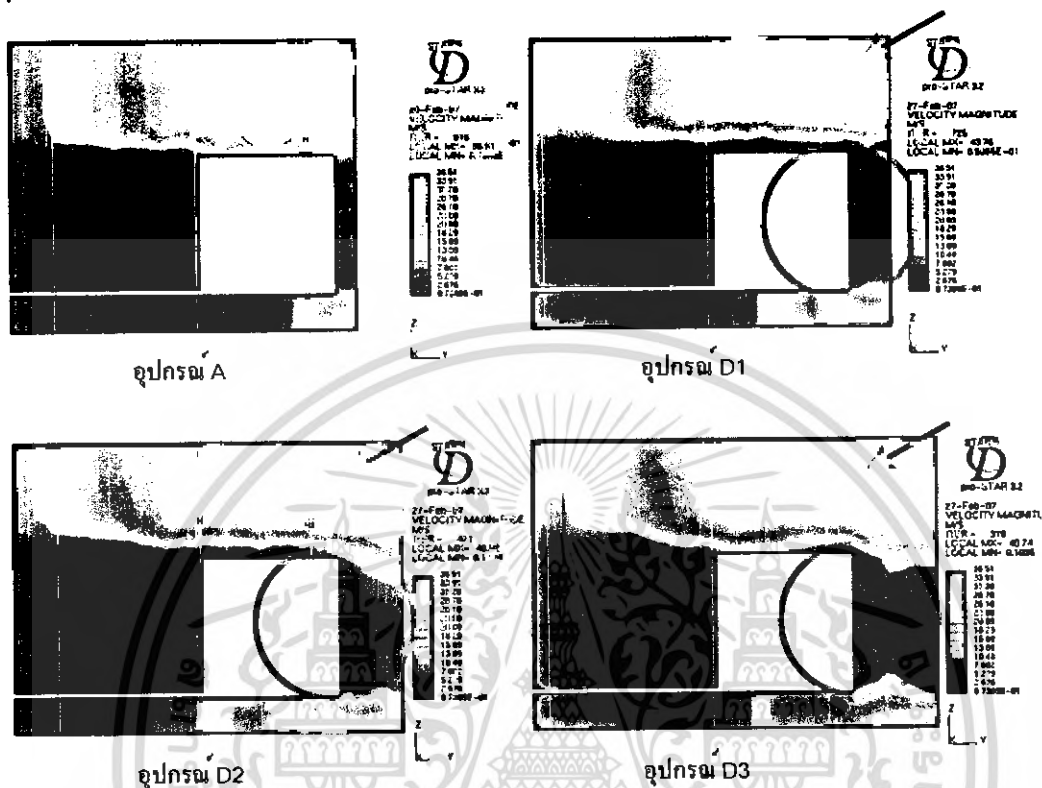
รูป 6.4 กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

จากตาราง 6.1 และรูป 6.4 เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะแรงคูดที่ได้จากอุปกรณ์ A มีค่าเท่ากับ 41.04648 อุปกรณ์ B1 มีค่าเท่ากับ 47.74876 อุปกรณ์ B2 มีค่าเท่ากับ 50.73962 และอุปกรณ์ B3 มีค่าเท่ากับ 58.83629 จากค่าของสมรรถนะของอุปกรณ์ B1, B2 และ B3 ที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ A เท่ากับ 6.70228, 9.69314 และ 17.78981 ตามลำดับ เนื่องที่เป็นตัวชี้วัดว่าการเปลี่ยนรูปร่างใบพัดแบบอุปกรณ์ B3 หรือการที่ใบพัดมีส่วนเว้า ส่งผลต่อการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการอันอากาศ ณ บริเวณระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบภายในอุปกรณ์สร้างแรงคูดอากาศกระแสไหลวนมากที่สุดในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ทั้ง 4 ชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A กับ อุปกรณ์ D1, D2 และ D3

### 6.3.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว



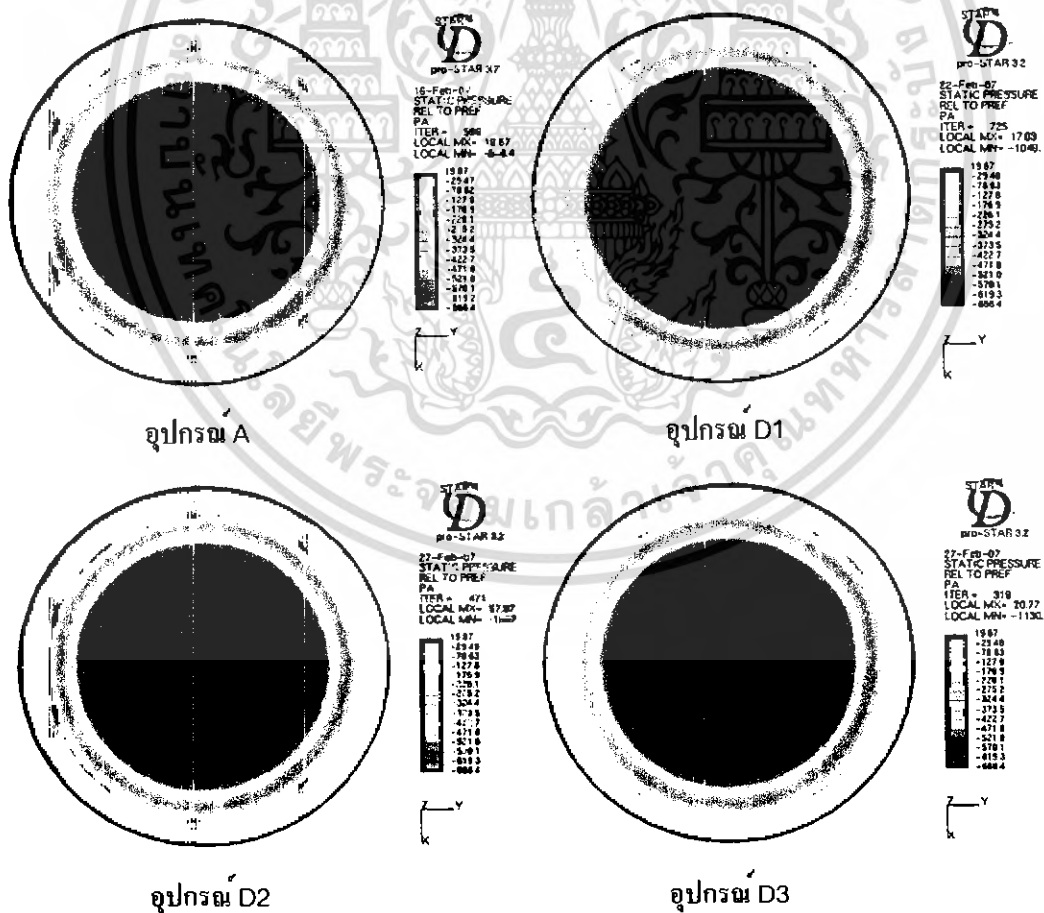
รูป 6.5 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ์ A, D1, D2, และ D3

จากรูป 6.5 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของสนามความเร็วความแนวแกน Y และ Z ของการไหลวนของอากาศที่มีการเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดชนิด A, D1, D2, และ D3 ตามลำดับ สำหรับอุปกรณ์ประเภท D ที่ได้มีการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบอุปกรณ์นั้น จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันดังรูป 6.5 สำหรับส่วนที่ 1 ณ บริเวณ ฐานใบพัดจนถึงบนสุดของใบพัด จากสีของเวกเตอร์ความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบของอุปกรณ์ชนิด A ที่มีสีเป็นสีม่วงและน้ำเงินเข้มหรือมีความเร็วสุทธิที่อยู่ในย่าน 0.07389 - 2.676 m/s แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างดังอุปกรณ์ D1, D2 และ D3 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นถึงช่องว่างที่มากขึ้น ส่งผลให้ทิศทางการไหลของอากาศมีการเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น ลดการชนอย่างทันทีกับกรอบครอบเมื่อออกจากใบพัด และความเร็วโดยรวมของอากาศ ณ บริเวณปลายใบพัดถึงกรอบครอบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์ D1 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีม่วงถึงสีครามหรือมีความเร็วของมวลอากาศอยู่ในย่าน 0.07389 - 7.682 m/s ส่วนอุปกรณ์ D2 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีน้ำเงินเข้มถึงสีฟ้าเข้มหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน 2.676 - 10.48 m/s และอุปกรณ์ D3 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีน้ำเงินถึงสีฟ้าเข้มหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน 0.2676 - 10.48

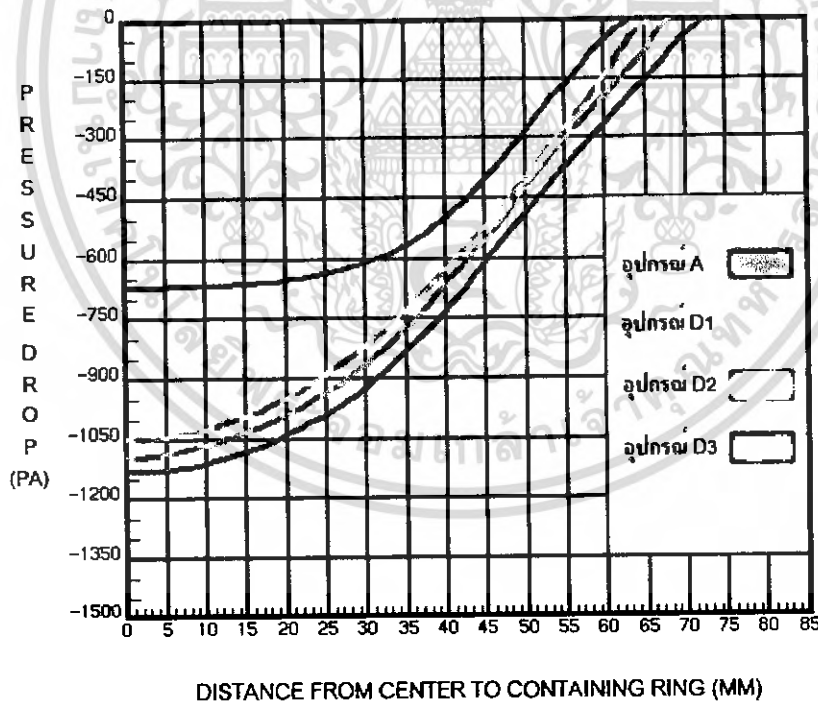
m/s โดยรวมแล้วความเร็ว  $\omega$  บริเวณปลายใบกับกรอบรอบของอุปกรณ D3 มีค่ามากที่สุดจากสี่ของความเร็วมี่ค่ามากออกจากใบมีพื้นที่มากที่สุด

สำหรับส่วนที่ 2 จากผลการจำลองความเร็ว  $\omega$  บริเวณเหนือใบพัด โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า อุปกรณ D1, D2 และ D3 นั้นมีสี่ของความเร็วมี่สัมพันธ์กันที่มีค่ามากมีบริเวณใหญ่กว่าอุปกรณ A จากปรากฏการณ์สามารถอธิบายเชื่อมโยงไปถึงความแตกต่างของความดันได้จากสมการ 3.51 ในบทที่ 3 ความเร็วของมวลอากาศที่มีค่ามากบริเวณขอบและความเร็วมี่ค่าต่ำบริเวณตรงกลางหรืออาจกล่าวได้ว่ายังมีความแตกต่างของความเร็วมี่ค่ามากเท่าไรยังส่งผลให้ความดันดกคร่อมมีค่ามากเท่านั้น ทั้งหมดนี้ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่าระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบรอบอุปกรณมีผลต่อการลดการสูญเสียของความเร็ว  $\omega$  บริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบอันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอันอากาศขึ้น โดยอุปกรณ D3 มีความเร็วโดยรวม  $\omega$  บริเวณปลายใบพัดกับกรอบรอบมากที่สุด และมีความแตกต่างของความเร็วโดยรวม  $\omega$  บริเวณเหนือใบพัดมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความดันดกคร่อมมากที่สุด ปรากฏการณ์จำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ D3 มีการสูญเสียของความเร็ว  $\omega$  บริเวณนั้นน้อยสุดจากอุปกรณ ทั้ง 4 ชนิด

### 6.3.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดันของอุปกรณ A, D1, D2 และ D3



สำหรับความดันที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนั้น จากการจำลองจะเห็นได้ถึง ความแตกต่างของความดันเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศหรือเรียกว่าความดันตกคร่อม โดยสังเกตได้จากรูป 6.6 ค่าของความดันตกคร่อมตรงกลางจะมีค่ามากและมีค่าลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ใน บทที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าของความดันตกคร่อมระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 4 จะสังเกตเห็นได้ถึงย่านสีที่แตกต่างกัน จาก สีของความดันตกคร่อมของแต่ละอุปกรณ์ สีม่วงหรือสีที่มีค่าของความดันตกคร่อมตั้งแต่ -668.4 หรือมีค่ามากกว่า ของอุปกรณ์ D3 จะมีความใหญ่ที่สุด โดยมี D2, D1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ โดยค่าของความดันตกคร่อมของ อุปกรณ์ D3 จะมีค่ามากที่สุดและมีค่าเท่ากับ -1130 ปาสคาล ส่วนอุปกรณ์ D2, D1 และ A จะมีค่าความดันตกคร่อม ที่มากที่สุดของแต่ละอุปกรณ์เท่ากับ -1097, -1049 และ -668.4 ปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 6.3.1 ที่แสดงพฤติกรรมของสนามความเร็ว สามารถดูรายละเอียดของความดันตกคร่อมได้ที่รูป 6.7 ที่แสดงกราฟความ สัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3 โดย จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่เหนือเส้นกราฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นยังมีค่ามากจะยิ่งส่งผลให้มีแรงดูดมากตาม ไปด้วย และจากกราฟพื้นที่ของอุปกรณ์ D3 มีค่ามากที่สุด โดยมีพื้นที่ของ D2, D1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ

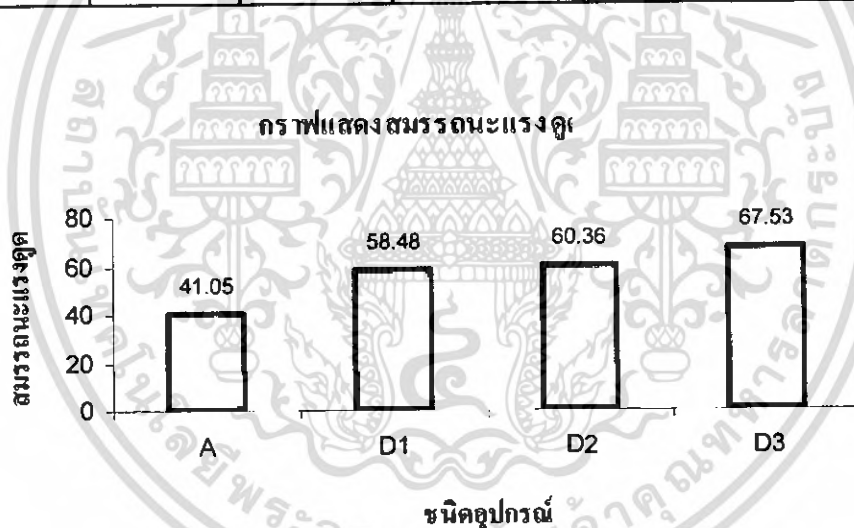


รูป 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะ จากจุดศูนย์กลางถึงกรอบของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3

สำหรับรูป 6.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้อธิบายวิเคราะห์หาสมรรถนะของแรงคูดของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3 สร้างขึ้นได้ โดยนำค่าของความดันเฉลี่ยต่อพื้นที่เฉลี่ยของอิเลเมนต์ที่ได้จากโปรแกรม STAR-CD® [6] เพื่อมาแทนลงในสมการที่ 3.53 โดยอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3 มีรายละเอียดของความดันตกคร่อม น้ำหนัก แรงคูดและสมรรถนะแรงคูดดังต่อไปนี้

ตาราง 6.2 แสดงค่าสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3

อุปกรณ์	ความดันตก "คร่อมเฉลี่ย"	แรงคูด (N)	น้ำหนัก (Kg)	สมรรถนะแรงคูด	ผลต่างสมรรถนะแรงคูด	เปอร์เซ็นต์เพิ่ม
A	325.94	4.126813	0.10054	41.04648	0.00000	-
D1	440.04	6.142538	0.10504	58.47864	17.43216	42.4693
D2	432.19	6.621207	0.10970	60.35961	19.31313	47.0518
D3	461.74	7.731616	0.11448	67.53447	26.48799	64.5317



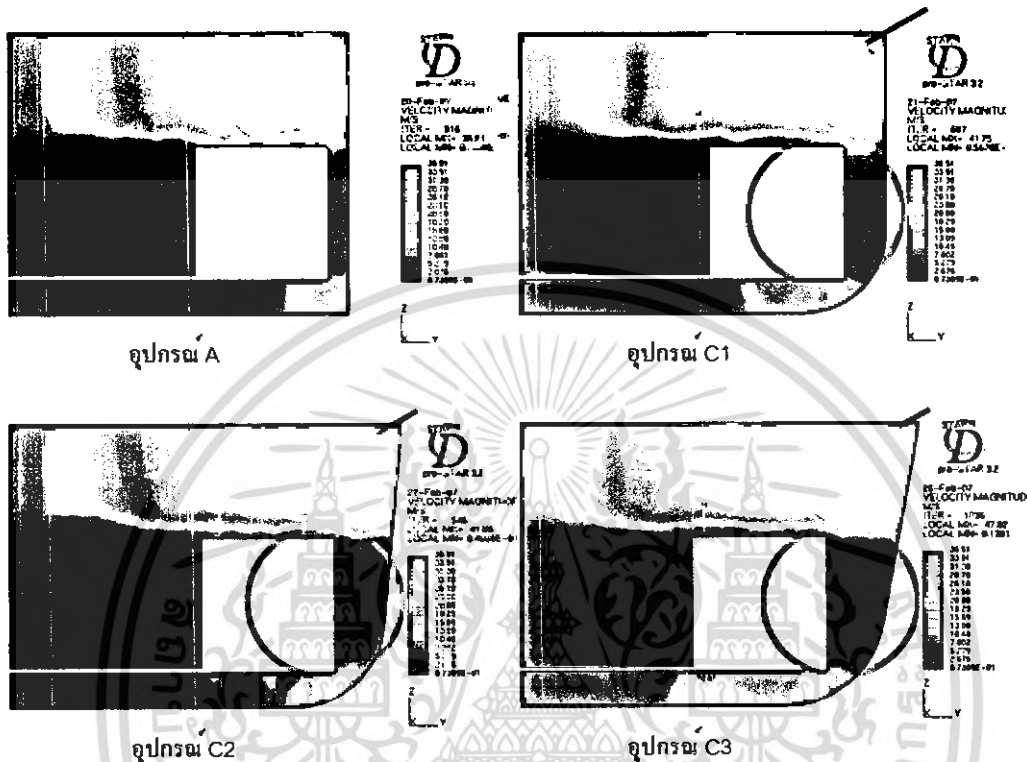
รูป 6.8 กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3

จากตาราง 6.2 และรูป 6.8 เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะแรงคูดที่ได้จากอุปกรณ์ A มีค่าเท่ากับ 41.04648 อุปกรณ์ D1 มีค่าเท่ากับ 58.47864 อุปกรณ์ D2 มีค่าเท่ากับ 60.35961 และอุปกรณ์ D3 มีค่าเท่ากับ 67.53447 จากค่าของสมรรถนะของอุปกรณ์ A, D1, D2 และ D3 ที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ A เท่ากับ 17.43216 ,19.31313 และ 26.48799 ตามลำดับ นี้เองที่เป็นตัวชี้วัดว่าการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบแบบอุปกรณ์ D3 ส่งผลต่อการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการอันอากาศ ณ บริเวณระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบภายในอุปกรณ์สร้างแรงคูดอากาศกระแสไหลวนมากที่สุดในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ทั้ง 4 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A กับ อุปกรณ์ C1, C2 และ C3

### 6.4.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 โดยสังเกตจากสนามความเร็ว



รูป 6.9 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3

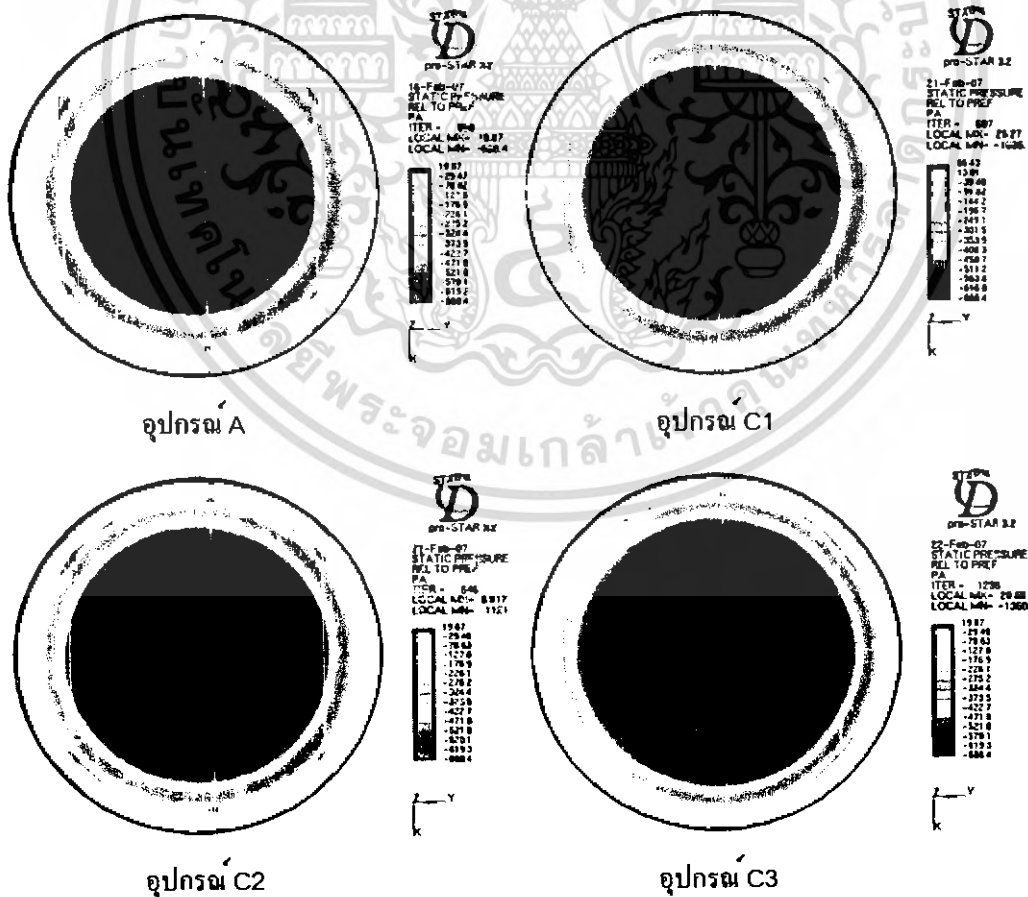
จากรูป 6.9 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของสนามความเร็วตามแนวแกน Y และ Z ของการไหลวนของอากาศที่มีการเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดชนิด A, C1, C2, และ C3 ตามลำดับ สำหรับอุปกรณ์ประเภท C ได้มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งรอบกรอบของอุปกรณ์นั้น เพื่อต้องการให้การเดินทางของอากาศมีความสิ้นไหลวนมากขึ้น และจากการจำลองแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันดังรูป 6.9 สำหรับส่วนที่ 1 ณ บริเวณ ฐานใบพัดจนถึงบนสุดของใบพัด จากสี่ของเวกเตอร์ความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบของอุปกรณ์ชนิด A ที่มีสีเป็นสีม่วงและน้ำเงินเข้มหรือมีความเร็วสุทธิที่อยู่ในย่าน  $0.07389 - 2.676 \text{ m/s}$  แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความโค้งของกรอบอุปกรณ์ C1, C2 และ C3 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นถึงช่องว่างที่มากขึ้นและความโค้งของกรอบ ส่งผลให้ทิศทางของอากาศมีการเคลื่อนที่ได้สะดวก สิ้นไหลวนมากขึ้น ลดการชนอย่างทันทีกับกรอบเมื่อออกจากใบพัด และความเร็วโดยรวมของอากาศ ณ บริเวณปลายใบพัดถึงกรอบ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์ C1 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบเป็นน้ำเงินเข้มถึงสีครามหรือมีความเร็วของอากาศอยู่ในย่าน  $2.676 - 7.682 \text{ m/s}$  ส่วนอุปกรณ์ C2 มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบเป็นสีน้ำเงินถึงสีครามหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน  $5.279 - 7.682 \text{ m/s}$  และอุปกรณ์ C3 อยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ มีสีของความเร็วยังคงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีน้ำเงินถึงสีครามหรือมีความเร็วอยู่ในย่าน 5.279-7.682 m/s โดยรวมแล้วความเร็ว ณ บริเวณปลายใบกับกรอบครอบของอุปกรณ์ C3 มีค่ามากที่สุดจากสีครามของความเร็วยังคงที่ออกจากใบมีพื้นที่มากที่สุด

ส่วนที่ 2 จากผลการจำลองความเร็ว ณ บริเวณเหนือใบพัด โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า อุปกรณ์ C1, C2 และ C3 นั้นมีสีของความเร็วยังคงถึงสีเข้มที่มีค่ามากมีบริเวณใหญ่กว่าอุปกรณ์ A จากปรากฏการณ์สามารถอธิบายเชื่อมโยงไปถึงความแตกต่างของความดันได้จากสมการ 3.51 ในบทที่ 3 ความเร็วของมวลอากาศที่มีค่ามากบริเวณขอบและความเร็วที่มีค่าต่ำบริเวณตรงกลางหรืออาจกล่าวได้ว่ายังมีความแตกต่างของความเร็วมากเท่าไรซึ่งส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่ามากเท่านั้น ทั้งหมดนี้ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่าความโค้งมนของกรอบครอบอุปกรณ์มีผลต่อการลดการสูญเสียของความเร็ว ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบอันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอันอากาศขึ้นโดยอุปกรณ์ C3 มีความเร็วโดยรวม ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบมากที่สุด และจากสีเข้มเข้มของความเร็วยังคงส่วนที่สองมีวงกว้าง มีความแตกต่างของความเร็วยังคง ณ บริเวณเหนือใบพัดมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมากที่สุด ปรากฏการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ C3 มีการสูญเสียของความเร็ว ณ บริเวณนั้นน้อยที่สุดจากอุปกรณ์ ทั้ง 4 ชนิด

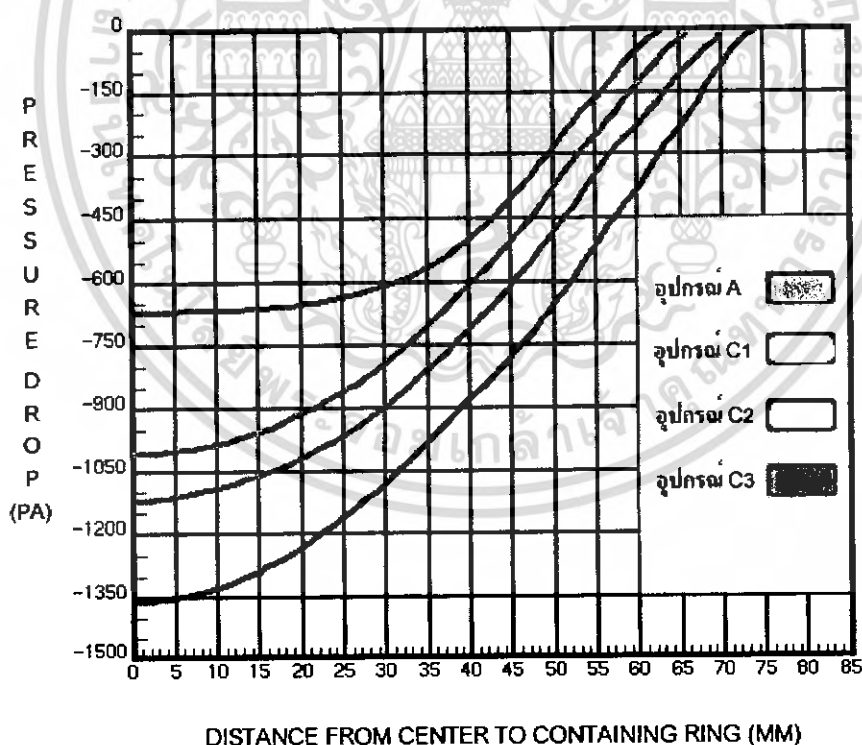
6.4.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดันของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3



รูป 6.10 แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความดันที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนั้น จากการจำลองจะเห็นได้ถึง ความแตกต่างของความดันเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศหรือเรียกว่าความดันตกคร่อม โดยสังเกตได้จากรูป 6.10 ค่าของความดันตกคร่อมตรงกลางจะมีค่ามากและมีค่าลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในตอนที 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าของความดันตกคร่อมระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 4 จะสังเกตเห็นได้ถึงย่านที่แตกต่างกัน จากสีของความดันตกคร่อมของแต่ละอุปกรณ์ สีม่วงหรือสีที่มีค่าของความดันตกคร่อมตั้งแต่ -668.4 หรือมีค่ามากกว่า ของอุปกรณ์ C3 จะมีความใหญ่ที่สุด โดยมี C2, C1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ โดยค่าของความดันตกคร่อม ของอุปกรณ์ C3 จะมีค่ามากที่สุดและมีค่าเท่ากับ -1360 ปาสคาล ส่วนอุปกรณ์ C2, C1 และ A จะมีค่าความดันตกคร่อมที่มากที่สุดของแต่ละอุปกรณ์เท่ากับ -1121, -1006 และ -668.4 ปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 6.4.1 ที่แสดงพฤติกรรมของสนามความเร็ว สามารถดูรายละเอียดของความดันตกคร่อมได้ที่รูป 6.11 ที่แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 โดยจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่เหนือเส้นกราฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นยังมีค่ามากจะยิ่งส่งผลให้มีแรงดูด มากตามไปด้วย และจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่ของอุปกรณ์ C3 มีค่ามากที่สุด โดยมีพื้นที่ของ C2, C1 และ A เล็กลงมาตามลำดับ

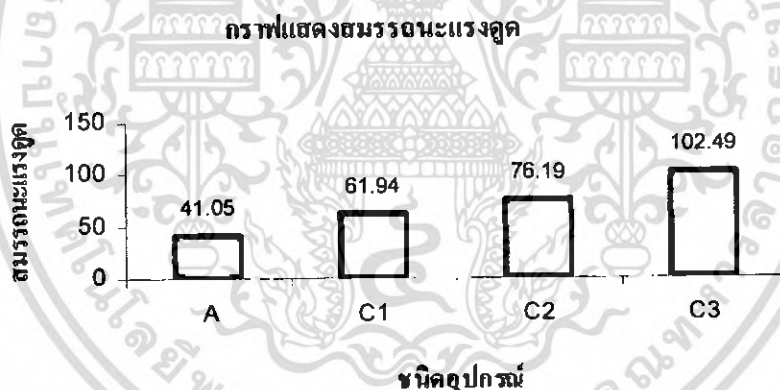


รูป 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลาง ถึงกรอบของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3

สำหรับรูป 6.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้อภิเคราะห์หาสมรรถนะของแรงคูดของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 สร้างขึ้นได้ โดยนำค่าของความดันเฉลี่ยต่อพื้นที่เฉลี่ยของอิเลเมนต์ที่ได้จาก โปรแกรม STAR-CD® [6] เพื่อมาแทนลงในสมการที่ 3.53 โดยอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 มีรายละเอียดของความดันตกคร่อม น้ำหนัก แรงคูดและสมรรถนะแรงคูดดังต่อไปนี้

ตาราง 6.3 แสดงค่าสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

อุปกรณ์	ความดันตกคร่อมเฉลี่ย	แรงคูด (N)	น้ำหนัก (Kg)	สมรรถนะแรงคูด	ผลต่างสมรรถนะแรงคูด	เปอร์เซ็นต์เพิ่ม
A	325.94	4.126813	0.10054	41.04648	0.00000	-
C1	444.40	6.203399	0.10015	61.94108	20.89460	50.9047
C2	494.81	7.758484	0.10183	76.18980	35.14332	85.6184
C3	609.46	10.650071	0.10391	102.49027	61.44379	149.6932



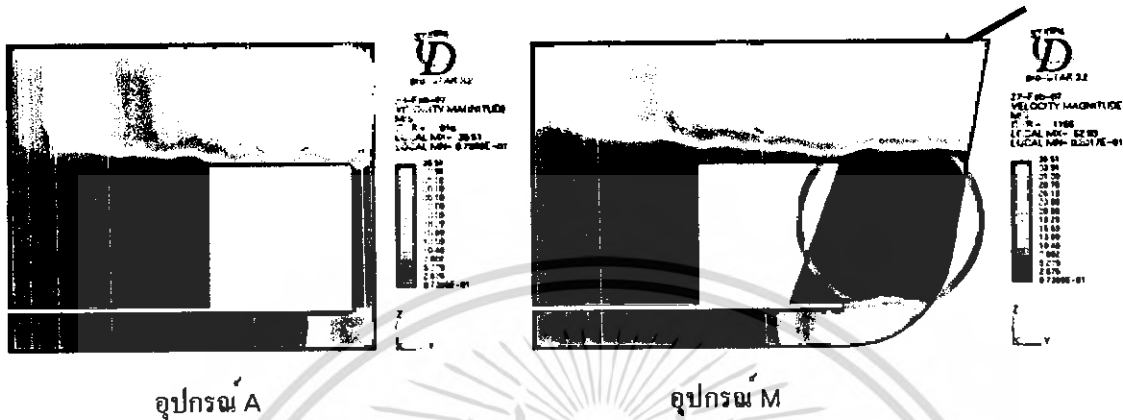
รูป 6.12 กราฟแท่งเปรียบเทียบสมรรถนะแรงคูดของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3

จากตาราง 6.3 และรูป 6.12 เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะแรงคูดที่ได้จากอุปกรณ์ A มีค่าเท่ากับ 41.04648 อุปกรณ์ C1 มีค่าเท่ากับ 61.94108 อุปกรณ์ C2 มีค่าเท่ากับ 76.18980 และอุปกรณ์ C3 มีค่าเท่ากับ 102.49027 จากค่าของสมรรถนะของอุปกรณ์ A, C1, C2 และ C3 ที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ A เท่ากับ 20.89460, 35.14332 และ 61.44379 ตามลำดับ นี่เองที่เป็นตัวชี้วัดว่าการเปลี่ยนความโค้งมนของกรอบครอบแบบอุปกรณ์ C3 ส่งผลต่อการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการอันอากาศ ณ บริเวณระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบภายในอุปกรณ์สร้างแรงคูดอากาศกระแสไหลวนมากที่สุดในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ทั้ง 4 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A กับ อุปกรณ์ M

### 6.5.1 พฤติกรรมการไหลวนภายในอุปกรณ์ A และ M โดยสังเกตจากสนามความเร็ว



รูป 6.13 แสดงการเปรียบเทียบสนามความเร็วของอุปกรณ์ A และ M

จากรูป 6.13 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของสนามความเร็วตามแนวแกน Y และ Z ของการไหลวนของอากาศที่มีการเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดชนิด A และ M ตามลำดับ สำหรับอุปกรณ์ประเภท M ได้มีการนำเอาลักษณะของอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะแรงดูดมากที่สุดของแต่ละหัวข้อในการปรับเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ โดยได้นำเอารูปแบบของอุปกรณ์ B3, D3 และ C3 มารวมกันออกแบบเป็นอุปกรณ์ M จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันดังรูป 6.13 ส่วนที่ 1 ณ บริเวณฐานใบพัดจนถึงบนสุดของใบพัด จากสีของเวกเตอร์ความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบของอุปกรณ์ชนิด A ที่มีสีเป็นสีม่วงและน้ำเงินเข้มหรือมีความเร็วสุทธิที่อยู่ในย่าน  $0.07389 - 2.676$  m/s แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์เป็นแบบอุปกรณ์ M จะสังเกตเห็นถึงช่องว่างที่มากขึ้น และความโค้งมนของกรอบครอบ ส่งผลให้ทิศทางการไหลของอากาศมีการเคลื่อนที่ได้สะดวก ไหลลื่นมากขึ้น ลดการชนอย่างทันทีกับกรอบครอบเมื่อออกจากใบพัด และความเร็วโดยรวมของอากาศ ณ บริเวณปลายใบถึงกรอบครอบ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์ M มีสีของความเร็วตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบเป็นสีน้ำเงินเข้มถึงสีน้ำเงินหรือมีความเร็วของอากาศอยู่ในย่าน  $2.676 - 5.279$  m/s โดยรวมแล้วความเร็ว ณ บริเวณปลายใบกับกรอบครอบของอุปกรณ์ M มีค่ามากกว่าอุปกรณ์ A จากสีน้ำเงินของความเร็วที่ออกจากใบมีพื้นที่มากกว่า

ส่วนที่ 2 จากผลการจำลองความเร็ว ณ บริเวณเหนือใบพัด โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า อุปกรณ์ M นั้นมีสีของความเร็วสีส้มเข้มที่มีค่ามากมีบริเวณใหญ่กว่าอุปกรณ์ A จากปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายเชื่อมโยงไปถึงความแตกต่างของความดันได้จากสมการ 3.51 ในบทที่ 3 ความเร็วของมวลอากาศที่มีค่ามากบริเวณขอบและความเร็วที่มีค่าต่ำบริเวณตรงกลางหรืออาจกล่าวได้ว่ายังมีความแตกต่างของความเร็วมักเท่าไรซึ่งส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่ามากเท่านั้น ทั้งหมดนี้ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่ารูปร่างใบพัด ระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบอุปกรณ์ และความโค้งมนมีผลต่อการลดการสูญเสียของความเร็วน บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบอันเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

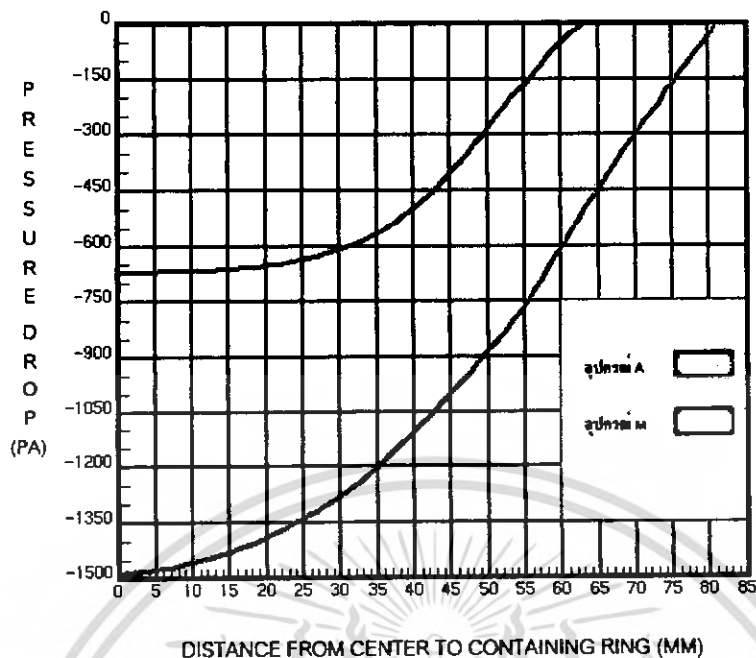
สาเหตุที่ทำให้เกิดการอันอากาศขึ้น โดยอุปกรณ์ M มีความเร็วโดยรวม ณ บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบมากสุด และจากสีเข้มเข้มของความเร็วตรงส่วนที่สองมีวงกว้าง มีความแตกต่างของความเร็วโดยรวม ณ บริเวณเหนือใบพัดมากที่สุด ส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมากที่สุด ปรากฏการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ M มีการสูญเสียของความเร็ว ณ บริเวณนั้นน้อยกว่าอุปกรณ์ A

### 6.5.2 พฤติกรรมความแตกต่างของความดัน A และ M



รูป 6.14 แสดงสนามความดัน ณ บริเวณบนสุดของอุปกรณ์ A และ M

สำหรับความดันที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนนั้น จากการจำลองจะเห็นได้ถึง ความแตกต่างของความดันเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศหรือเรียกว่าความดันตกคร่อม โดยสังเกตได้จากรูป 6.14 ค่าของความดันตกคร่อมตรงกลางจะมีค่ามากและมีค่าลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าของความดันตกคร่อมระหว่างอุปกรณ์ A และ M จะสังเกตเห็นได้ถึงย่านสีที่แตกต่างกัน จากสีของความดันตกคร่อมของแต่ละอุปกรณ์ จะสังเกตเห็นได้ว่าสีม่วงหรือสีที่มีค่าของความดันตกคร่อมตั้งแต่ -668.4 หรือมีค่ามากกว่า ของอุปกรณ์ M จะมีความใหญ่กว่า A ค่อนข้างมาก โดยค่าของความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ M จะมีค่ามากที่สุดและมีค่าเท่ากับ -1488 ปาสคาล ส่วนของอุปกรณ์ A จะมีค่าความดันตกคร่อมที่มากที่สุดเท่ากับ -668.4 ปาสคาล ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 6.5.1 ที่แสดงพฤติกรรมของสนามความเร็ว สามารถดูรายละเอียดของความดันตกคร่อมได้ที่รูป 6.15 ที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A และ M โดยจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่เหนือเส้นกราฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นยังมีค่ามากจะยิ่งส่งผลให้มีแรงดูดมากตามไปด้วย และจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่ของอุปกรณ์ M มีค่ามากกว่า A มาก



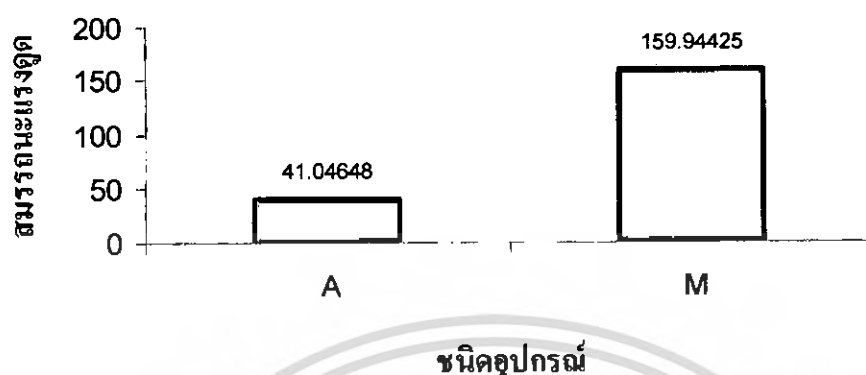
รูป 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A และ M

สำหรับรูป 6.15 สามารถนำข้อมูลที่ได้อธิบายวิเคราะห์หาสมรรถนะของแรงดูดของอุปกรณ์ A และ M สร้างขึ้นได้ โดยนำค่าของความดันเฉลี่ยต่อพื้นที่เฉลี่ยของอิลเมนต์ที่ได้จากโปรแกรม STAR-CD® [6] เพื่อมาแทนลงในสมการที่ 3.53 โดยอุปกรณ์ A และ M มีรายละเอียดของความดันตกคร่อม น้ำหนัก แรงดูดและสมรรถนะแรงดูดดังต่อไปนี้

ตาราง 6.4 แสดงค่าสมรรถนะแรงดูดของอุปกรณ์ A, B1, B2 และ B3

อุปกรณ์	ความดันตกคร่อมเฉลี่ย	แรงดูด (N)	น้ำหนัก (Kg)	สมรรถนะแรงดูด	ผลต่างสมรรถนะแรงดูด	เปอร์เซ็นต์เพิ่ม
A	325.94	4.126813	0.10054	41.04648	0.00000	-
M	851.63	17.662164	0.11043	159.94425	118.89777	289.6662

### กราฟแสดงสมรรถนะแรงดูด



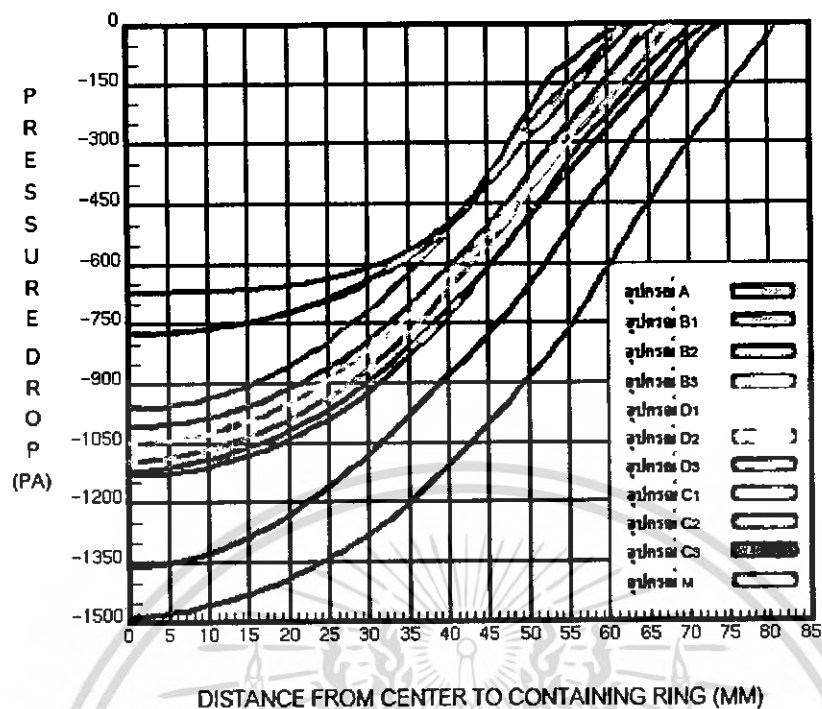
รูป 6.16 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะแรงดูดของอุปกรณ์ A และ M

จากตาราง 6.4 และรูป 6.16 เปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะแรงดูดที่ได้จากอุปกรณ์ A มีค่าเท่ากับ 41.04648 และอุปกรณ์ M มีค่าเท่ากับ 159.94425 จากค่าของสมรรถนะของอุปกรณ์ M ที่เพิ่มขึ้นจากอุปกรณ์ A เท่ากับ 289.6662 นี้เองที่เป็นตัวชี้วัดว่าการเปลี่ยนรูปร่างใบพัดแบบ ระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบ เป็นอุปกรณ์ M ทั้งหมดนี้เมื่อมารวมกัน ได้ส่งผลอย่างมากต่อการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการอื่นอากาศ ณ บริเวณระหว่างปลายใบพัดกับกรอบครอบภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

#### 6.6 ผลการจำลองเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M

จากผลการจำลองการไหลของอากาศภายในอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนของอุปกรณ์ต่างๆ ข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบรวมอุปกรณ์ทั้งหมด เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของความดัน สมรรถนะแรงดูด และเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์แต่ละชนิด

จากรูป 6.17 แสดงกราฟของความดันตกคร่อมตั้งแต่จุดศูนย์กลางจนถึงขอบขอบของอุปกรณ์แต่ละชนิด โดยจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่เหนือเส้นกราฟของแต่ละอุปกรณ์นั้นซึ่งมีค่ามากจะยิ่งส่งผลให้มีแรงดูดมากตามไปด้วย และจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่ของอุปกรณ์ M มีค่ามากกว่าทุกอุปกรณ์ โดยมีอุปกรณ์ C3, D3, C2, D2, D1, C1, B1, B2, B3 และ A มีพื้นที่น้อยลงตามลำดับ จากผลของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์หาแรงดูดและสมรรถนะแรงดูดได้ ดังตาราง 6.5



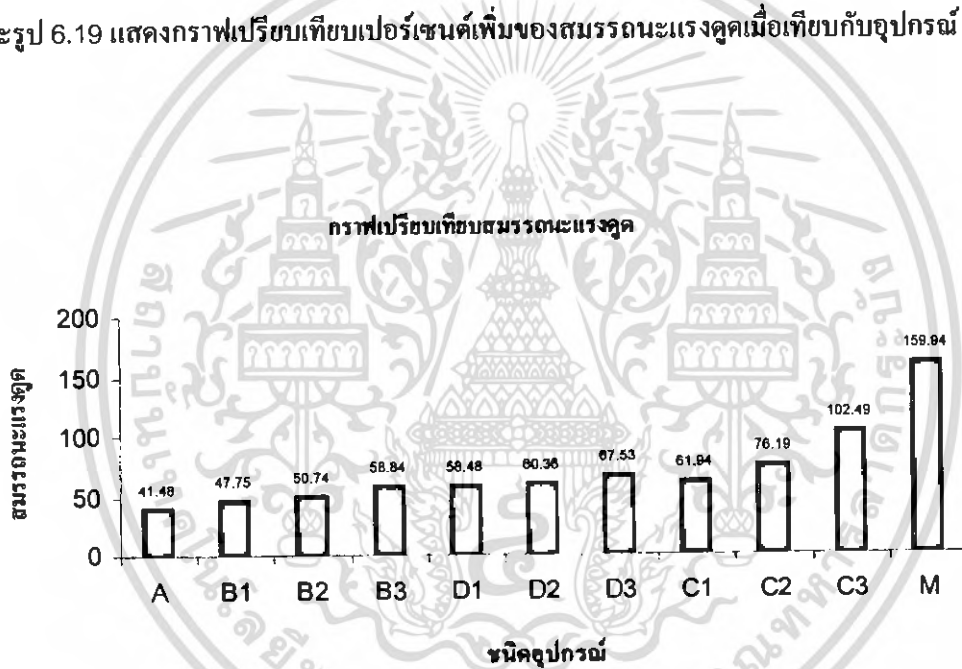
รูป 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับระยะจากจุดศูนย์กลางถึงกรอบครอบของอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M

ตาราง 6.5 แสดงค่าสมรรถนะแรงดูดของอุปกรณ์ A, B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M

อุปกรณ์	ความดันตกคร่อมเฉลี่ย	แรงดูด (N)	น้ำหนัก (Kg)	สมรรถนะแรงดูด	รัศมีอุปกรณ์ (mm)	ปริมาตร (mm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (Kg)	ผลต่างสมรรถนะแรงดูด	เปอร์เซ็นต์เพิ่ม
A	329.40	4.1706	0.1005	41.4822	63.500	37226.5979	0.1005	0.0000	-
B1	375.85	4.7587	0.0997	47.7488	63.500	36911.9120	0.0997	6.7023	16.3285
B2	395.99	5.0137	0.0988	50.7396	63.500	36597.2804	0.0988	9.6931	23.6150
B3	455.23	5.7638	0.0980	58.8363	63.500	36282.6449	0.0980	17.7898	43.3406
D1	440.04	6.1425	0.1050	58.4786	66.675	38903.2816	0.1050	17.4322	42.4693
D2	432.19	6.6212	0.1097	60.3596	69.850	40628.2329	0.1097	19.3131	47.0518
D3	461.74	7.7316	0.1145	67.5345	73.025	42401.4481	0.1145	26.4880	64.5317
C1	444.40	6.2034	0.1002	61.9411	66.675	37042.6592	0.1000	20.8946	50.9047
C2	494.81	7.7585	0.1018	76.1898	70.665	37715.0162	0.1018	35.1433	85.6184
C3	609.46	10.6501	0.1039	102.4903	74.600	38486.1799	0.1039	61.4438	149.6932
M	851.63	17.6622	0.1104	159.9442	81.270	40898.9206	0.1104	118.8798	289.6662

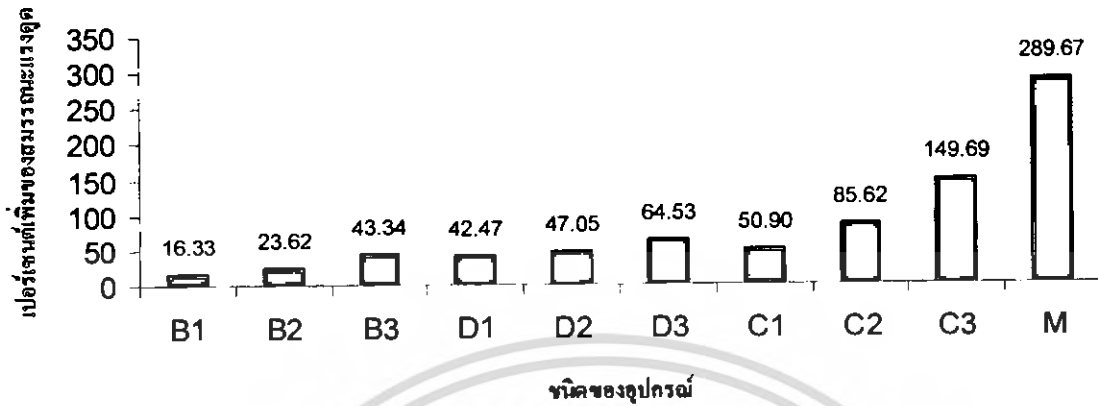
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากตาราง 6.5 แสดงรายละเอียดของค่าความดันตกคร่อม แรงดูด น้ำหนัก สมรรถนะแรงดูด รัศมี ปริมาตร ผลต่างสมรรถนะแรงดูด และเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A จากตาราง สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์ M มีค่าสมรรถนะแรงดูดสูงสุดเท่ากับ 159.9442 และมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A ถึง 289.662 เปอร์เซ็นต์ อุปกรณ์ B1 และ B2 จะมีสมรรถนะแรงดูดแตกต่างจาก อุปกรณ์ A เล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 47.75 และ 50.74 อุปกรณ์ B3, D1 และ C1 นั้นมีสมรรถนะแรงดูดใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 58.84, 58.48 และ 61.94 ส่วนอุปกรณ์ D2, D3 และ C2 จะมีค่าสมรรถนะแรงดูดที่มากขึ้นอีกจาก ที่กล่าวมาโดยมีค่าเท่ากับ 60.36, 67.53 และ 76.19 และอุปกรณ์ C3 จะมีค่าสมรรถนะแรงดูดสูงเป็นอันดับสอง รองจากอุปกรณ์ M โดยมีค่าเท่ากับ 102.49 ค่าทั้งหมดนี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ความโค้งมนของกรอบ กรอบนั้นมีผลต่อสมรรถนะแรงดูดค่อนข้างมาก โดยมีความสำคัญของระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับกรอบกรอบ และรูปร่างใบพัดรองลงมาตามลำดับ ดังรูป 6.18 ที่แสดงให้เห็นกราฟเปรียบเทียบสมรรถนะแรงดูดของแต่ละ อุปกรณ์ และรูป 6.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A



รูป 6.18 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะแรงดูดของอุปกรณ์ A B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M

กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A



รูป 6.19 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เพิ่มของสมรรถนะแรงดูดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ A ของอุปกรณ์ B1, B2, B3, D1, D2, D3, C1, C2, C3 และ M

จากวิธีการพัฒนาและออกแบบโดยใช้โปรแกรม STAR-CD<sup>®</sup> [6] เข้ามาช่วย ทำให้ผลการสิ้นเปลืองของต้นทุน และเวลาที่จะเสียไปกับการทดลองจริงในแต่ละกรณี และจากผลการจำลองได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการพัฒนาโดยการปรับเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ เพื่อบรรลุเป้าหมายของการลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการอื่น อากาศตรงบริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบ โดยอุปกรณ์ M เป็น อุปกรณ์ต้นแบบที่ได้มีการนำเอาส่วนดีของการปรับเปลี่ยนรูปร่างในแต่ละกรณี ที่ได้จากการจำลองการไหลมารวมกันเป็น ต้นแบบที่จะนำไปสร้างชุดทดลองจริง เพื่อทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

## บทที่ 7

# การออกแบบสร้างและทดสอบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศ กระแสไหลวนต้นแบบ

จากพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนด้วยการทำการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้โครงการนี้เป็นรูปธรรมมากขึ้นทางผู้จัดทำจึงมีความมุ่งหมายที่จะสร้างแบบจำลองของจริงขึ้นมาเพื่อทำการศึกษา ทดลองและเพื่อเก็บข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนในสภาพการณ์จริงตามขนาดที่เหมือนกับการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ทุกประการ ทั้งนี้เพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่าที่จากการทดลองกับค่าจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันหรือไม่

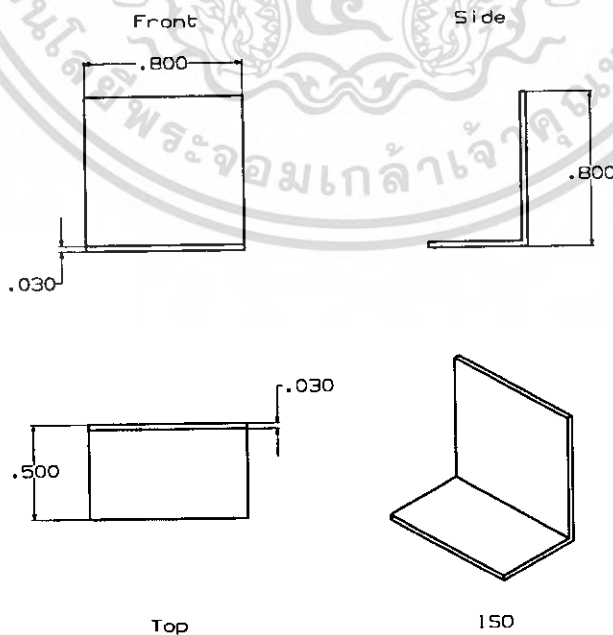
### 7.1 การออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนต้นแบบ

#### 7.1.1 ใบพัด

ในการทำการออกแบบขนาดใบพัดในการทดลองจริงที่จะใช้ในการกวนอากาศภายในตัวดูดอากาศกระแสไหลวน เพื่อให้สร้างสภาวะความแตกต่างของความดันภายใน ได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบความสมรรถนะในการขีตติที่ดัดขึ้นของใบพัดรูปแบบใหม่จึงมีการสร้างใบพัดออกมา 2 แบบ คือ แบบแรกสร้างเหมือนตัวต้นแบบเดิม กับ แบบที่สองซึ่งเป็นแบบใหม่จะมีการเว้าของใบพัดเข้ามามีส่วนด้วย

##### 7.1.1.1 ใบพัดแบบเดิม

ใบพัดแบบเดิมนี่ซี่ใบพัดแต่ละซี่ จะมีพื้นที่ 2.032 ซม. x 2.032 ซม. (0.8 นิ้ว x 0.8 นิ้ว) ซึ่งจะมีพื้นที่เท่ากับ 4.13 ตร.ซม. ดังรูป 7.1

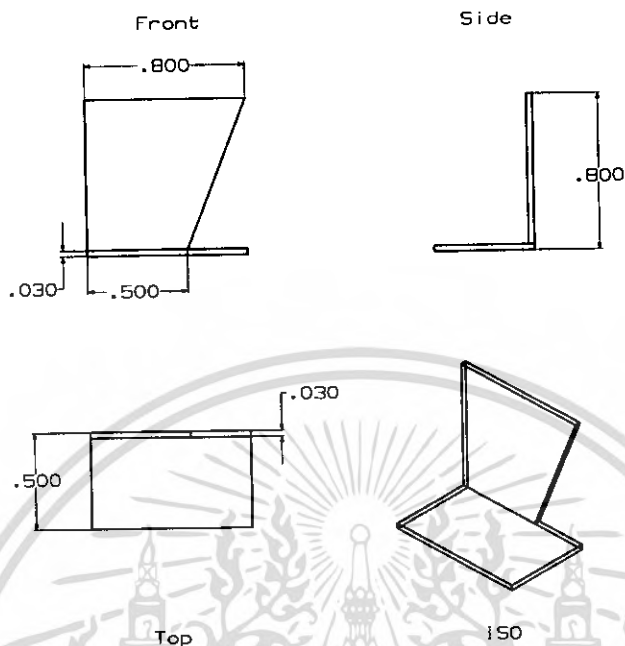


รูป 7.1 ซี่ใบพัดรูปแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

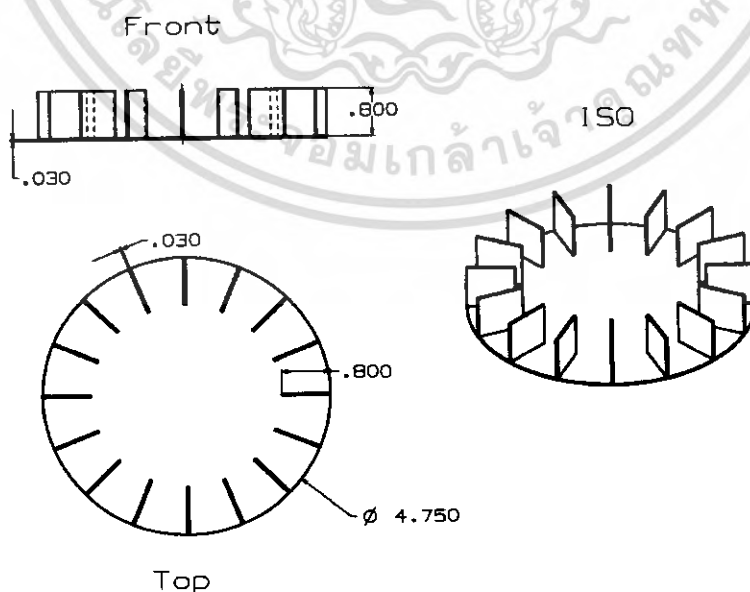
### 7.1.1.2 ไบพัตแบบใหม่

ไบพัตแบบใหม่นี้ซึ่งขนาดไบพัตด้านบนกับด้านล่างจะไม่เท่ากัน โดยด้านบนจะมีขนาด 2.032 ซม.(0.8 นิ้ว) ส่วนด้านล่างจะมีขนาด 1.27 ซม.(0.5 ซม.) ดังนั้นไบพัตแต่ละซี่ จะมีพื้นที่เท่ากับ 3.48 ตร.ซม. ดังรูป 7.2



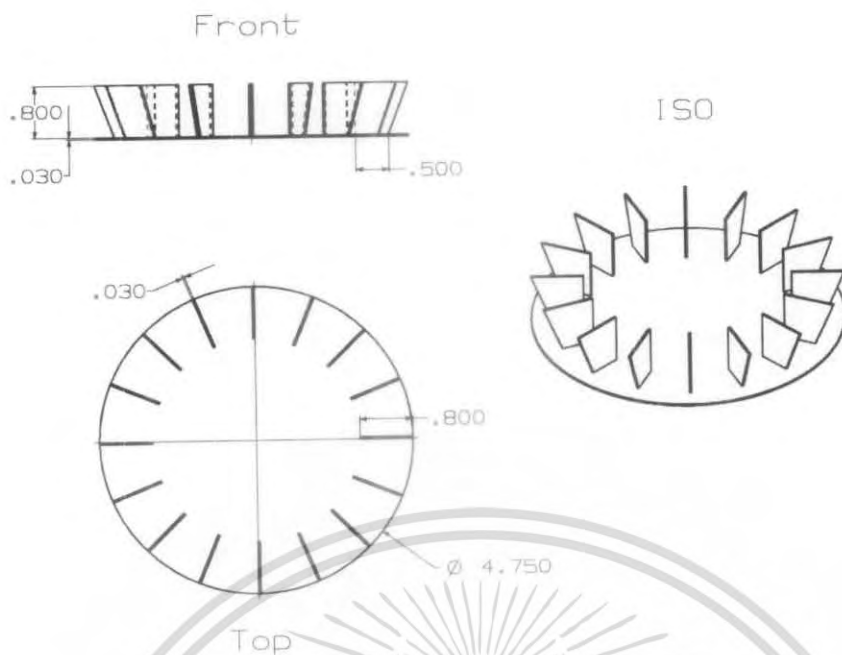
รูป 7.2 ซี่ไบพัตรูปแบบใหม่

จากการออกแบบขนาดพื้นที่ไบพัตแต่ละซี่ในทั้งสองรูปแบบแล้ว เราทำการออกแบบจำนวนไบพัตเพื่อใช้ในการสร้างสภาวะความแตกต่างของความดันภายในได้อย่างเหมาะสมและทดสอบได้ โดยไบพัตจะมีจำนวนซี่ไบพัต 16 ซี่ไบพัต และไบพัตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.065 ซม. (4.75 นิ้ว) โดยแบบเดิมมีน้ำหนักรวม 55.7 กรัม ดังรูป 7.3, 7.5 และ 7.6 ส่วนแบบใหม่มีน้ำหนักรวม 52.8 กรัม ดังรูป 7.3, 7.7 และ 7.8



รูป 7.3 ไบพัตรูปแบบเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

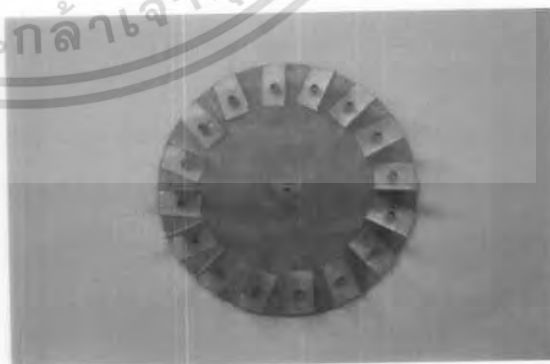
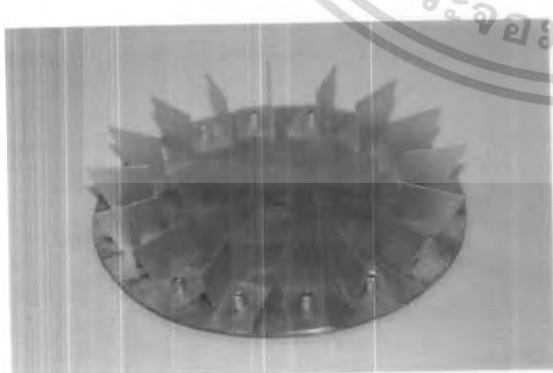


รูป 7.4 ใบพัดรูปขอบใบไม้



รูป 7.5 ใบพัดรูปแบบเก่าในแนวด้านข้าง

รูป 7.6 ใบพัดรูปแบบเก่าในแนวด้านบน



รูป 7.7 ใบพัดรูปแบบใหม่ในแนวด้านข้าง

รูป 7.8 ใบพัดรูปแบบใหม่ในแนวด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.1.2 ชุดอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

### 7.1.2.1 กรอบครอบ

ในการออกแบบกรอบครอบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน เนื่องจากตัวครอบแบบใหม่ของเราได้ออกแบบมาเพื่อลดการรั่วของอากาศและให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างคล่องตัวขึ้น ลักษณะของกรอบครอบจึงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบเดิมค่อนข้างมาก การประดิษฐ์จะยึดติดกับรูปแบบเดิมไม่ได้จึงต้องมองหาผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดคล้ายกับแบบที่ได้วางไว้ ดังนั้นเราจึงได้ใช้ภาชนะอลูมิเนียมมาปรับใช้ซึ่งประกอบไปด้วย โครงสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในในส่วนของก้นภาชนะ 4.5 นิ้ว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนของปากภาชนะ 8 นิ้ว สูง 2.5 นิ้ว ดังรูป 7.9



รูป 7.9 วัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้ทำกรอบครอบ

### 7.1.2.2 ตัวค้ำยัน

เราต้องทำการออกแบบโครงค้ำยันเพื่อยึดติดกับกรอบครอบ ดังรูป 7.10 ซึ่งจะช่วยสร้างความมั่นคง แข็งแรง และง่ายต่อการทดลองในการทดสอบอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนในการยึดติดกับผนังและเพดาน



รูป 7.10 ตัวค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.1.3 มอเตอร์

อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนมีกำลังขับของใบพัดจะมาจาก มอเตอร์ขนาด 9.4 โวลต์ หรือเรียกว่า "มอเตอร์ 480" ตามศัพท์ที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาดทั่วไป โดยความเร็วสูงสุดประมาณ 14,000 รอบต่อนาที ดังรูป 7.11



รูป 7.11 ตัวค้ำยัน

### 7.1.4 ชุดเฟืองทด

เนื่องจากเราต้องการให้รอบการหมุนของใบพัดต่ำลงและแรงบิดสูงขึ้นจึงต้องมีการนำชุดเกียร์หรือชุดเฟืองทดรอบมาใช้ในการทดรอบใบพัดลง โดยมีอัตราส่วน 2 : 1 โดยชุดเฟืองท้อมีลักษณะตามรูป 7.12

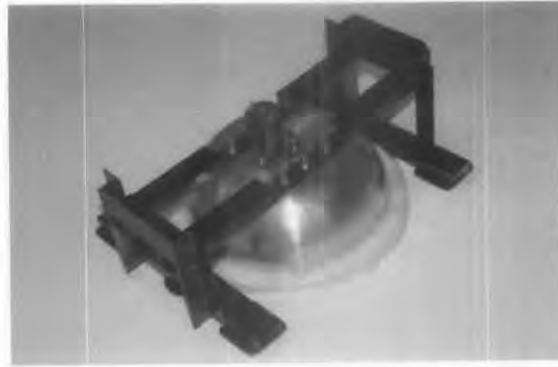


รูป 7.12 ชุดเกียร์ทดรอบ

### 7.1.5 โครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน

จากรูป 7.13 จะเป็นภาพชุดอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนที่มีครบทุกอุปกรณ์โดยมีน้ำหนักรวม 502 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 7.13 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนคั่นแบบ

## 7.2 การทดลองอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน (Vortex Attractor)

### 7.2.1 ทดลองสมรรถนะของใบพัดทั้งสองแบบ

จากการออกแบบใบพัดทั้งสองแบบและอุปกรณ์ทั้งหมดของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนในเบื้องต้น ต่อจากนี้จะเป็นการทำการทดสอบสมรรถนะของใบพัดทั้งสองแบบเพื่อมีจุดประสงค์ที่จะวัดค่าความสามารถของใบพัดทั้งสองพร้อมกับเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างสภาวะความแตกต่างของความดันในแต่ละชนิดของใบพัด

ในการทำการทดสอบใบพัดทั้งสองแบบ โดยจะจัดให้มีใบพัดทั้งหมด 16 ชุดต่อหนึ่งใบใหญ่เหมือนกัน โดยทำการควบคุมใบพัดทั้งสองให้ทำงานในความเร็วรอบที่ขงวด ช่วงความเร็วคือ 6000, 6250, 6500, 6750 และ 7000 รอบต่อนาที โดยใช้ DC Power Supply ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับความเร็วรอบของใบพัดกวนอากาศ และใช้ Tachometer ในการวัดความเร็วรอบของใบพัดที่กึ่งที่และสม่ำเสมอ เพื่อที่เราจะได้ทราบถึงความสามารถในการสร้างสภาวะกระแสไหลวนของอากาศของใบพัดทั้งสองแบบ เพื่อจะได้เปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของใบพัดทั้งสองที่รอบความเร็วการหมุนแต่ละช่วง

#### 7.2.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

##### 1) อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนคั่นแบบ



รูป 7.14 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนคั่นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) DC Power Supply

เป็นแหล่งให้กระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ และสามารถปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ความเร็วรอบค่า ๆ หนึ่งได้



รูป 7.15 DC Power Supply

3) Tachometer

เป็นเครื่องวัดความเร็วรอบของของใบพัด เพื่อทราบความเร็ว รอบที่ต้องการทดลอง



รูป 7.16 Tachometer พร้อมกล่องใส่เครื่องมือ

รูป 7.17 Tachometer

4) เครื่องชั่งน้ำหนัก

ใช้ชั่งน้ำหนักของน้ำในการทดลอง เพื่อที่จะทราบถึงขนาดของแรงดึงของใบพัดแต่ละแบบ



รูป 7.18 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) ชุดการทดลอง



รูป 7.19 ชุดการทดลอง

## 7.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าจาก DC Power Supply ให้กับมอเตอร์ขั้วไบพอลเพื่อทวนอากาศให้เกิดสถานะกระแสไหลวน ซึ่งจะสร้างแรงดูดยึดติดกับกระจก ดังรูป 7.20



รูป 7.20 อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนขณะทำงาน

- 2) ทำการปรับความเร็วรอบที่ต้องการ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก DC Power Supply ให้ได้ความเร็วรอบค่าหนึ่ง และใช้ Tachometer ในการวัดความเร็วรอบของไบพอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 7.21 ทำการปรับกระแสและความตึงเพื่อให้ได้รอบการหมุนที่เหมาะสม

3) ทำการเติมน้ำลงในถังเสมือนแรงดึงดูดอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน เพื่อจะได้ทราบถึงความสามารถในการรับภาระของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน



รูป 7.22 ขณะเทน้ำวัดความสามารถในการรับน้ำหนัก

4) เมื่อได้น้ำหนักค่าหนึ่งของการรับภาระสูงสุดของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนแล้ว นำ  
 ถังน้ำไปชั่งน้ำหนักเพื่อทราบแรงดึงดูดที่กระทำ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 7.23 วัตต์น้ำหนักน้ำ

- 5) ทำการบันทึกค่าแรงดึงที่กระทำกับอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวน ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์
- 6) จากนั้นทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความถี่รอบตามที่ต้องการ โดยปรับค่าความต่างศักย์และกระแส
- 7) ทำการทดลองตามขั้นตอนเดิมทั้งหมดแต่มีการเปลี่ยนใบพัดเป็นใบพัดแบบใหม่ ทำการบันทึกและสรุปผลการทดลองต่อไป

### 7.3 ผลการทดลองและแนวทางการประเมินผล

#### 7.3.1 เปรียบเทียบสมรรถนะของรูปแบบใบพัดแบบเดิมกับแบบใหม่

ในกรณีนี้จะมีใบพัดแบบเก่าและแบบใหม่มาเข้ามามีผลของการทดลอง เพื่อที่จะให้เห็นถึงสมรรถนะที่สูงขึ้นของใบพัดที่ได้รับการออกแบบใหม่ที่มุ่งเน้นไปที่การออกแบบเพื่อลดการสูญเสียสมรรถนะอื่นเนื่องจากการอื่น อากาศบริเวณปลายใบ ทั้งนี้โครงสร้างของกรอบครอมจะเป็นลักษณะโค้งมนตามการออกแบบใหม่

ตาราง 7.1 ตารางผลการทดลองแสดงสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบเดิม

ความเร็วรอบใบพัด (รอบต่อนาที)	น้ำหนักที่รับได้ (กรัม)	น้ำหนักเฉลี่ยที่รับ ได้(กรัม)	แรงที่รับได้ (นิวตัน)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ เฉลี่ย(โวลต์)	กำลังเฉลี่ย (วัตต์)
6000	886.4	894.9	8.77	3.21	7.2	23.112
	895.1					
	903.5					
6250	942.3	951.4	9.33	3.33	7.4	24.642
	950.8					
	961.3					
6500	1005.6	1012.8	9.93	3.47	7.7	26.719
	1013.2					
	1019.7					
6750	1052.8	1059.1	10.38	3.6	7.9	28.44
	1061.3					
	1063.3					
7000	1101.2	1106.5	10.85	3.72	8.2	30.504
	1105.9					
	1112.3					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไปสำนักงานการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

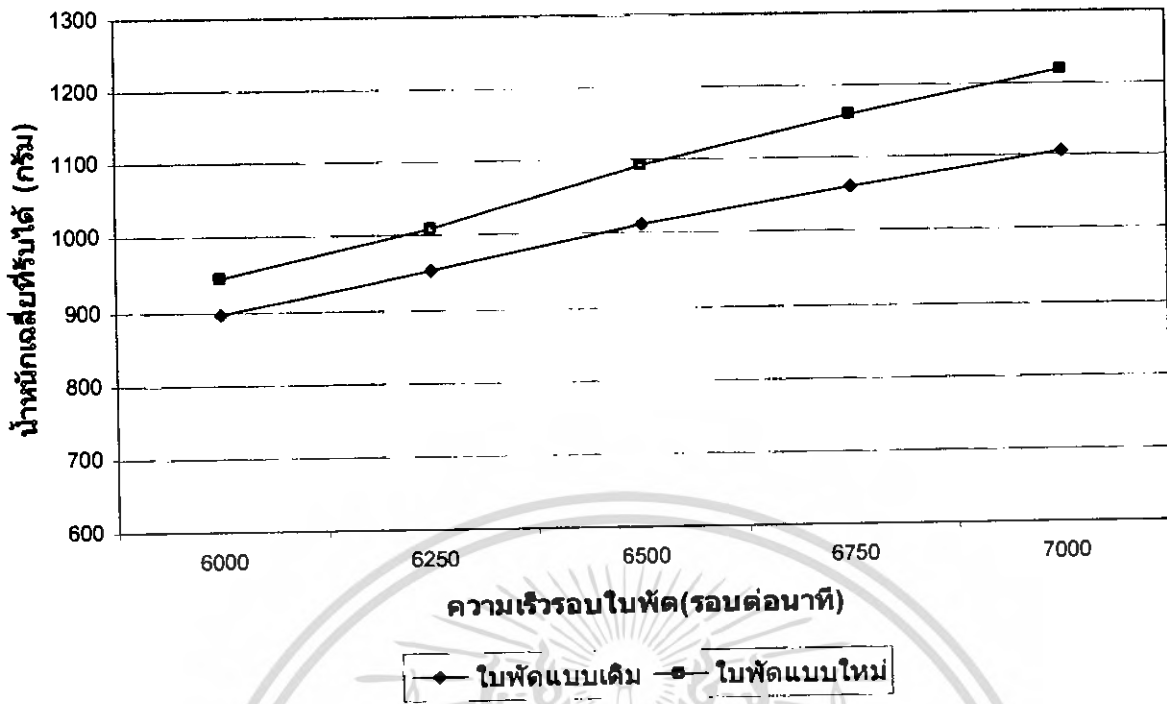
ตาราง 7.2 ตารางผลการทดลองสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบใหม่

ความเร็วรอบใบพัด (รอบต่อนาที)	น้ำหนักที่รับได้ (กรัม)	น้ำหนักเฉลี่ยที่รับ ได้(กรัม)	แรงที่รับได้ (นิวตัน)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ เฉลี่ย(โวลต์)	กำลังเฉลี่ย (วัตต์)
6000	941.6	945.8	9.27	2.74	6.1	16.714
	946.8					
	949.1					
6250	1008.2	1010.4	9.91	2.91	6.4	18.624
	1010.9					
	1012.3					
6500	1085.6	1091.8	10.7	3.04	6.7	20.368
	1092.3					
	1097.5					
6750	1158.5	1161.2	11.4	3.21	7	22.47
	1161.6					
	1163.4					
7000	1213.1	1219.8	12	3.36	7.2	24.192
	1218.4					
	1227.9					

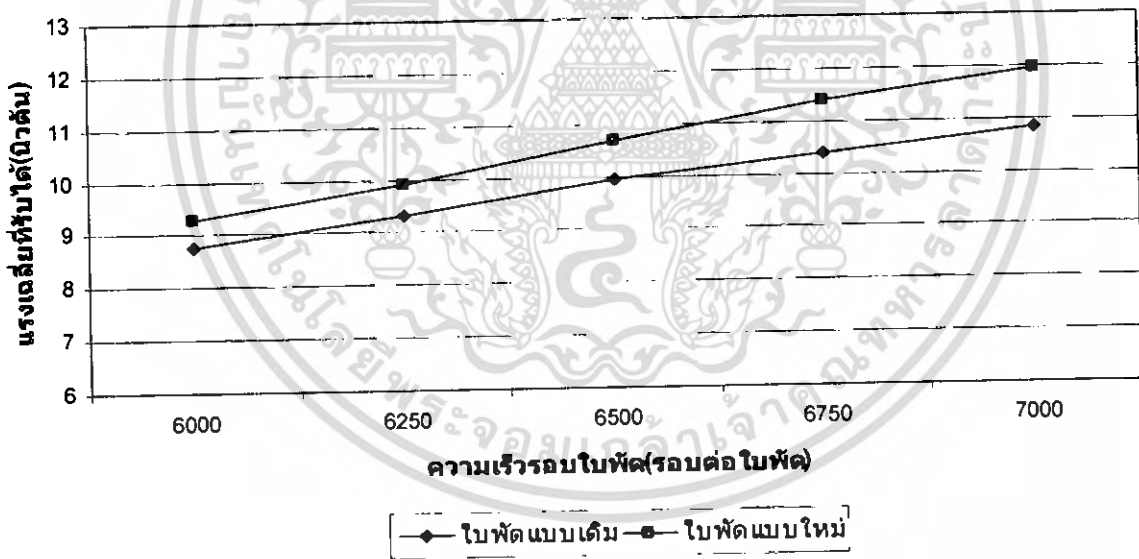
ตาราง 7.3 ตารางผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในการรับภาระแรงของใบพัดแบบเดิมและใบพัดแบบใหม่

ความเร็วรอบใบพัด (รอบต่อนาที)	รูปแบบใบพัด	น้ำหนักเฉลี่ยที่รับได้ (กรัม)	แรงที่รับได้ (นิวตัน)	% สมรรถนะของแรง ที่สูงขึ้นของใบพัดใหม่
6000	แบบเดิม	849.9	8.77	5.70%
	แบบใหม่	945.8	9.27	
6250	แบบเดิม	951.4	9.33	6.22%
	แบบใหม่	1010.4	9.91	
6500	แบบเดิม	1012.8	9.93	7.85%
	แบบใหม่	1091.8	10.71	
6750	แบบเดิม	1059.1	10.38	9.73%
	แบบใหม่	1161.2	11.39	
7000	แบบเดิม	1106.5	10.85	10.23%
	แบบใหม่	1219.8	11.96	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 7.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบใบพัดทั้งสองแบบตามค่าน้ำหนักของน้ำที่รับได้ (กรัม) กับความเร็วรอบใบพัด



รูป 7.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบใบพัดทั้งสองแบบตามขนาดแรงที่รับได้ (นิวตัน) กับความเร็วรอบใบพัด

#### 7.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและกราฟแสดงผลให้เห็นอย่างแรก ได้อย่างชัดเจนว่าแรงที่อุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศ กระแสไหลวนรับได้หรือภาวะแรงดึงดูดจะแปรผันตรงต่อความเร็วรอบของใบพัดเพราะเมื่อเราปรับความเร็วรอบ การหมุนให้สูงขึ้นการรับน้ำหนักน้ำในถังก็จะมากขึ้นตามมา นอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่อเรานำผลการทดลองของใบ พัดเดิมและใบพัดใหม่ หลังจากเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าใบพัดแบบใหม่มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงกว่า แบบเดิม โดยจากค่าแรงที่รับได้ตามตารางจะเป็นตัวบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าใบพัดแบบใหม่จะมีความสามารถใน การรับน้ำหนักน้ำที่สูงกว่าใบพัดเดิมอย่างแน่นอน เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้าน การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรับน้ำหนักสูงกว่าในทุกรอบการหมุนตั้งแต่ 6,000-7,000 รอบต่อนาทีโดยจากผลการทดลองค่าเปอร์เซ็นต์สมรรถนะของแรงที่สูงขึ้นของใบพัดใหม่เมื่อเทียบกับใบพัดเก่าจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นซึ่งหมายความว่าความสามารถในการยึดติดพื้นผิวจะสูงกว่าเช่นกันเนื่องจากมีแรงดูดที่สูงกว่าเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### บทสรุปและวิจารณ์

ในโครงการการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศแบบกระแสไหลวนโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์หรือโปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD<sup>®</sup> [6] เข้ามาช่วยในการดำเนินงานนั้น เริ่มจากการศึกษาถึงเทคโนโลยีหุ่นยนต์ใต้น้ำที่มีอยู่ในปัจจุบัน แล้วทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบ โดยทางคณะผู้จัดทำได้สังเกตเห็นความสามารถของเทคโนโลยีการยึดเกาะผนังแบบตัวดูดอากาศกระแสไหลวนที่ยังมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาให้มีสมรรถนะในการยึดติดสูงขึ้น ทั้งในด้านการออกแบบระบบและอุปกรณ์ ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงต้องใช้เวลาในการศึกษาหลักการการทำงานของระบบนี้อย่างละเอียดเพื่อที่จะได้มองเห็นจุดอ่อนที่สมควรได้รับพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ ทั้งนี้เราได้นำระบบการสร้างการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการจำลองเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากการทดลองจริง จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวดูดอากาศกระแสไหลวนภายใต้เงื่อนไขที่เราได้วางกรอบพัฒนาขึ้นและน่าจะเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทดสอบสมรรถนะและประเมินผลเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์

#### 8.1 บทสรุปและประเมินผล

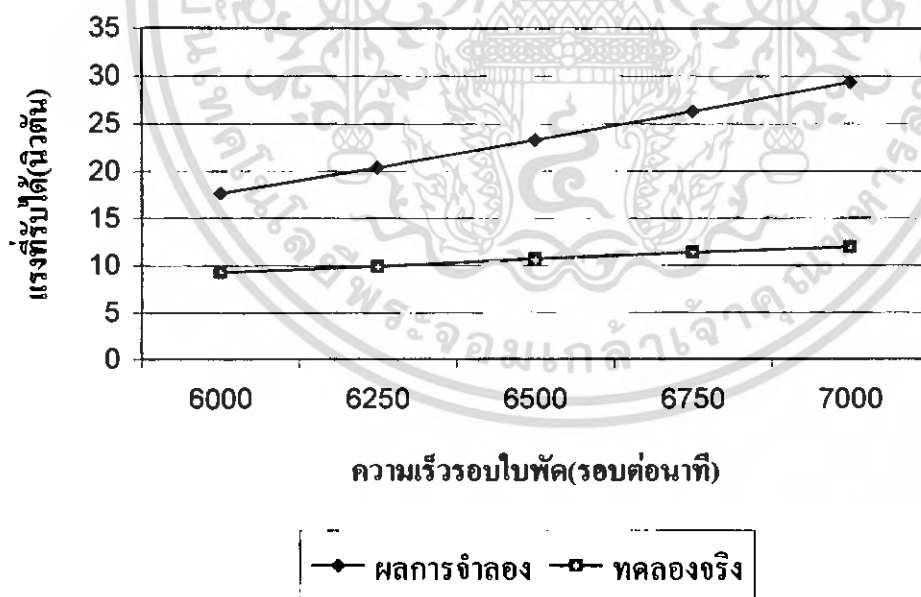
##### 8.1.1 สรุปผลเชิงเปรียบเทียบของผลการจำลองกับการทดลอง

เพื่อให้สามารถดูแนวโน้มของผลการทดลองจึงได้มีการเปรียบเทียบ 2 กรณีระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ เราจะทำการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะในการรับภาระแรงหรือสมรรถนะในการยึดติดของทั้งสองกรณี ณ ความเร็วรอบต่างๆ ดังตารางที่ 8.1 และจากรูป 8.1 จะเห็นว่าแนวโน้มของแรงที่รับได้ของอุปกรณ์สร้างแรงดูดอากาศกระแสไหลวนมีทิศทางไปในทางเดียวกันในทุกค่าความเร็วรอบของการหมุน แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่าแรงดูดที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ของตัวอุปกรณ์จำลองจะมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองจริงประมาณเท่าตัว นอกจากนี้แนวโน้มของแรงที่รับได้จากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแรงที่รับ ณ ความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปได้มากกว่าผลการทดลองจริง โดยสังเกตได้จากเส้นความชันของกราฟผลจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ที่มีความชันสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อันเนื่องมาจากผลจากการจำลองได้ถูกแก้สมการมาจากทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลจริง แต่ผลจากการจำลองนั้นมีข้อจำกัดหลายอย่างที่ส่งผลให้ผลของแรงดูดนั้นมีค่าน้อยลงเช่น ตัวหมุนยึดใบพัดกับฐานใบพัดนั้นไปขวางการไหลของอากาศ อุปกรณ์ต้นแบบไม่ได้มีความเหมือนกับอุปกรณ์ที่จำลองทั้งหมดเนื่องจากปัญหาในการจัดหาอุปกรณ์ การสั่นของตัวอุปกรณ์อันเนื่องจากปัญหาทางด้าน Vibration ของโครงสร้างเป็นต้น แต่ทั้งนี้เราก็สามารถสรุปได้ว่าผลที่ได้จากทั้งสองกรณีมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจนและผลจากการจำลองสอดคล้องกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงค่าแรงที่รับได้กับค่าสมรรถนะจากการจำลองสถานการณ์  
ทางคอมพิวเตอร์กับการทดลองจริง ณ ความเร็วรอบต่างๆ

ความเร็วรอบใบพัด (รอบต่อนาที)	กรณีการทำงาน	แรงที่รับได้(นิวตัน)
6000	ผลการจำลอง	17.66
	ผลทดลองจริง	9.27
6250	ผลการจำลอง	20.43
	ผลทดลองจริง	9.91
6500	ผลการจำลอง	23.31
	ผลทดลองจริง	10.71
6750	ผลการจำลอง	26.3
	ผลทดลองจริง	11.39
7000	ผลการจำลอง	29.41
	ผลทดลองจริง	11.96



รูป 8.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงที่รับได้จากการจำลองสถานการณ์  
ทางคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง ณ ความเร็วรอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.1.2 ประเมินผลการจำลองกับการทดลอง

จากผลจากการเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงกับผลจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ เราจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างมากประมาณเท่าตัว ทั้งนี้อันเนื่องมาจากผลจากการจำลองได้ถูกแก้สมการมาจากทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลจริง แต่ผลจากการทดลองนั้นมีข้อจำกัดหลายอย่างที่ส่งผลให้ผลของแรงคูดนั้นมีความน้อยลงดังตัวอย่างต่อไปนี้

- ตัวหมุดยึดใบพัดกับฐานใบพัดนั้นไปขวางการไหลของอากาศ
- อุปกรณ์ต้นแบบไม่ได้มีความเหมือนกับอุปกรณ์ที่จำลองทั้งหมดเนื่องจากปัญหาในการจัดหาและสร้างอุปกรณ์
- การสั่นของตัวอุปกรณ์อันเนื่องจากปัญหาทางด้าน Vibration ของโครงสร้าง
- การรั่วไหลของอากาศระหว่างอุปกรณ์กับกำแพงหรือผนัง

ทั้งหมดนี้ทำให้บันทึกอนิจิตความสามารถในการรับภาระแรงหรือสร้างแรงในการยึดติดลดลงเมื่อเทียบกับระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ หากในอนาคตได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างและวัสดุในการผลิตตัวคูดกระแสไหลวนใหม่คาดว่าจะทำให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์มากขึ้นอย่างแน่นอน

### 8.1.3 สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลของการดำเนินงานในด้านการสร้างสถานการณ์จำลองทางคอมพิวเตอร์ผลที่ได้เป็นไปตามแผนที่วางไว้เป็นอย่างดีที่น่าพอใจ

- การจำลองทำให้เห็นถึงพฤติกรรมต่างๆ ที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากการทดลองจริง และช่วยให้สมรรถนะในการวิเคราะห์การจำลองโดยการอ้างอิงจากทฤษฎีที่ได้เล่าเรียนมาเพิ่มขึ้น
- ผลการจำลองที่ได้ทำการวางขอบเขตที่จะพัฒนาการลดการสูญเสียอันเนื่องจากการอื่นอากาศที่บริเวณปลายใบพัดกับกรอบครอบ นั้นเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ว่าจะส่งผลดีขึ้น และเพิ่มสมรรถนะในการยึดติดให้มากขึ้น
- การนำเอาการจำลองมาช่วยในการดำเนินงานในการพัฒนาและออกแบบตัวอุปกรณ์สร้างแรงคูดอากาศกระแสไหลวนนี้ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริงไปได้เยอะ เนื่องจากลดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดจากปัญหาหน้างานที่เราไม่อาจล่วงรู้ได้ในแต่ละการทดลองที่มีหลายกรณีให้ศึกษา

ในด้านการทดสอบสมรรถนะของตัวคูดกระแสไหลวนต้นแบบใหม่ให้ผลที่ได้เป็นไปตามแผนอย่างเป็นที่น่าพอใจ

- ผลจากการออกแบบใบพัดใหม่ทำให้ความสามารถในการยึดติดของตัวคูดกระแสไหลวนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับใบพัดรูปแบบเดิม
- ผลการทดลองสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์

## 8.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

ในตลอดระยะเวลาการดำเนินงานที่ผ่านมาได้มีปัญหาและอุปสรรคในเรื่องของการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์โดยการศึกษาหาวิธีการที่จะใช้มากำหนดปัญหาในการจำลอง ทั้งนี้ได้มีการลองใช้หลายวิธีการด้วยกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียเวลาในการทำการจำลอง แต่ก็ได้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ที่ประติดประต่อกันจนได้หนทางในการสร้างวิธีการกำหนดขั้นตอนต่างๆ ในการจำลองได้ และเนื่องด้วยโปรแกรมการจำลองการไหลที่ใช้ในที่นี่คือโปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD<sup>®</sup> [6] เป็นโปรแกรมที่มีฟังก์ชันการใช้งานค่อนข้างหลากหลายส่งผลให้ต้องมีการศึกษาและถามหาความรู้จากผู้รู้เยอะ จึงส่งผลให้เสียเวลาในการศึกษาค่อนข้างนาน

นอกจากนี้ปัญหาส่วนใหญ่ทางด้านของการประดิษฐ์ตัวสร้างแรงดูดกระแสไหลวนต้นแบบจะอยู่ที่ความยุ่งยากในการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานขึ้นมา เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ว่าจะเป็น ชุดเกียร์ทดรอบและอะไหล่ต่างๆ นั้นไม่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปเป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้ในวงการเครื่องบินบังคับซึ่งหาได้ยากและมีราคาแพงทำให้การดำเนินงานทางด้านการศึกษาประดิษฐ์ค่อนข้างเสียเวลาไปในครั้งนี้ค่อนข้างมาก ส่วนในด้านของกรรมวิธีการประดิษฐ์ต้องอาศัยการลองผิดลองถูกว่าจะได้ใบพัดและชุดทดลองที่มีความแข็งแรงและมีสมรรถนะที่ดีที่สุด โดยทางด้านการทำใบพัดให้แข็งแรงและเสถียรนั้นถือว่าเป็นสิ่งที่ยากลำบากมาก ในตอนแรกทางเราได้ใช้การวัดอุณหภูมิใบพัดกับงานใบพัดแต่เนื่องจากการยึดติดจากความร้อนไม่สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำเมื่อใบพัดหมุนได้ส่งผลให้ใบพัดหลุดเสียหายและใช้การไม่ได้ จึงต้องเปลี่ยนมาใช้การยึดติดด้วยความร้อนและสวิตควบลูกกัน ไปจึงจะสามารถใช้การได้ ทางผู้คณะจัดทำจึงขอเสนอแนวทางแก้ไขด้านการยึดติดใบพัดว่า ให้ใช้การเชื่อมแบบ Spot Welding เข้าช่วยน่าจะเป็นทางแก้ทั้งปัญหาการยึดติดใบพัดและปัญหาการสั่นของใบพัดได้ ส่วนทางด้านของการทดสอบนับว่าไม่มีปัญหาระหว่างดำเนินงานเท่าใดนักและให้ผลเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง

ทั้งหมดนี้ทางผู้คณะจัดทำได้เล็งเห็นว่าองค์ความรู้ที่ได้รวบรวมเขียนไว้ในปฏิญญาพันธบัตรเล่มนี้น่าจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาในด้านนี้ไม่มากนักน้อยและจะช่วยให้งานมีการพัฒนาขึ้นต่อไป

## 8.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต

การจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ในปฏิญญาพันธบัตรนี้ได้ใช้โปรแกรมทาง CFD ที่มีชื่อว่า STAR-CD<sup>®</sup> [6] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความหลากหลายและละเอียดในการกำหนดค่าค่อนข้างมาก ซึ่งถ้าเรามีความเข้าใจในการใช้โปรแกรมเพียงใดผลของการจำลองก็จะมีผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น แต่ทั้งนี้การที่จะเข้าใจในการใช้โปรแกรมนั้นต้องมีความเข้าใจในทฤษฎีของ CFD ด้วย ฉะนั้นแนวทางพัฒนาในอนาคตนั้นจึงแนะนำให้ศึกษาทฤษฎีและการใช้โปรแกรมก่อน จะส่งผลให้การจำลองมีความแม่นยำและความสามารถในการวิเคราะห์ผลมากขึ้นด้วย

เวลาที่ใช้ในการจำลองการไหลในรูปแบบที่มีความละเอียดสูงจะส่งผลให้ใช้เวลาในการจำลองนาน ดังนั้นถ้าเราสามารถทำการจำลองเพียงแค่ส่วนเดียวของรูปร่างอุปกรณ์ที่มีความคล้ายคลึงกันได้จะทำให้ลดเวลาในการจำลองได้มาก

ในการทดลองจริงมีหลายอย่างที่ป็นปัจจัยมารบกวน ทางด้านของตัววัสดุในการทำใบพัดที่ทางเราใช้แผ่นสังกะสีในการทำงานใบพัดและอลูมิเนียมในการทำตัวใบพัดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปขณะทำงานหากมีการพัฒนาในอนาคตทางผู้จัดทำเห็นว่าน่าจะมองหาวัสดุและกรรมวิธีการผลิตอื่นที่ทำให้มีความแข็งแรงและเสถียร

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น โดยอาจจะใช้การหล่อเรซินเข้ามาช่วยในการผลิตชุดไบพัต ทางด้านโครงสร้างของตัวไบพัต ณ ชิ้นงาน อาจจะมีส่วนในการสร้างผลกระทบที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนการไหลเวียนของอากาศในบางจุด โดยเฉพาะบริเวณจุดที่ยึดติดไบพัตด้วยลิเวตที่อาจทำให้การไหลเวียนของอากาศไม่คล่องตัวเท่าที่ควร จึงมีความเห็นว่าควรปรับปรุงตรงจุดนี้ในอนาคต

ในส่วนสุดท้ายที่เป็นแนวทางการพัฒนา คือ การลดการสั่นสะเทือนจากการหมุนของไบพัตซึ่งเป็นการบั่นทอนขีดความสามารถที่สำคัญในการรับภาระแรงให้ลดลงเมื่อเทียบกับระบบในอุดมคติจากการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ตามมานอกจากนี้คืออาจทำให้อุปกรณ์บางส่วนที่ทนรับการสั่นสะเทือนได้น้อยอาจเสียหายได้ หากในอนาคตได้ทำการปรับปรุง โครงสร้างและวัสดุในการผลิตตัวชุดกระแสไหลวนใหม่ คาดว่าน่าจะให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์มากขึ้นและมีสมรรถนะที่สูงขึ้นตามมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Reinfeld, L. Illingworth, Vortex Attractor with Vanes Attached to Containing Ring and Backplate, United States Patent No. 6,802,693 B2, 2004
- [2] Pijush K. Kundu. Oceanographic Center Nova University Dania, Florida, Ira M. Cohen. Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania. Fluid Mechanics Third Edition 2004.
- [3] Bruce R. Munson Donald F. Theodore H. Okiishi. Fundamentals of Fluid Mechanics. Fourth Edition 2004.
- [4] Edward J. Shaughnessy, Jr., Ira M. Katz, James P. Schaffer. Introduction to Fluid Mechanics. Fourth Edition 2004. Oxford
- [5] Joseph H. Spurk, with the assistance of H. Marschall. Fluid Mechanics Problems and Solutions. Springer
- [6] Computational Dynamics Ltd. STAR-CD Version 3.24 Methodology. 2005.
- [7] Structural Dynamics Research Corp. Analysis Modules Copyright, MSC.visualNastran 2002
- [8] <http://www.vortexhc.com>
- [9] Jizhong Xiao, Ali Sadegh, Matthew Elliott, Angel Calle, Avinash Persad, Ho Ming Chiu, Design of Mobile Robots with Wall Climbing Capability, Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005
- [9] Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, London: Longman Group Ltd. 1995.